Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

STAT

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ПРОБЛЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕЧНОГО СТОКА

Выпуск 6

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
Москва · 1956

STAT

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

СЕКЦИЯ ПО НАУЧНОЙ РАЗРАБОТКЕ ПРОБЛЕМ ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА

ПРОБЛЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕЧНОГО СТОКА

Выпуск 6

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
Москва · 1956

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Ответственный редактор академик *С. Я. Жук*

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

ПРЕДИСЛОВИЕ

В сборник включены статьи, посвященные различным методическим вопросам, связанным с регулированием и использованием рек. Статья «Основы методики расчета русловых процессов, вызываемых на реках искусственным изменением их режима», выполненная коллективом авторов, является итогом совместной трехлетней работы Секции по научной разработке проблем водного хозяйства Академии наук СССР, Государственного гидрологического института, Главного управления гидрометслужбы, а также ряда других научно-исследовательских и проектно-изыскательских учреждений. Указанная работа выполнялась согласно постановлению Совета Министров СССР, направлялась и координировалась Секцией.

К той же области русловых процессов относится тематически связанная с первой статья К. И. Россинского «Местный размыв речного дна в нижних бьефах крупных гидротехнических сооружений». В этой статье, основанной на значительном экспериментальном материале, дан теоретический анализ гидравлических явлений, наблюдающихся в нижних бьефах водосливных плотин, расположенных на нескальных размываемых основаниях, и изложены практические приемы расчета размывов русла. Предлагаемые приемы были применены в практике проектирования Куйбышевской и Сталинградской гидроэлектростанций.

В статье С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля «Об оценке вероятной повторяемости редко наблюдаемых гидрологических явлений» изложены математические построения, на которые опирается оценка вероятной повторяемости отдельных гидрологических и метеорологических явлений, относящихся к категории редко повторяющихся событий. Подобные задачи в проектировании встречаются при сопоставлении теоретических построений с результатами непосредственных наблюдений, при исследовании исключительно высоких и низких расходов воды и т. п.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Статья тех же авторов «О двоякоограниченной кривой распределения вероятностей и применении ее к гидрологическим расчетам» посвящена приемам математического описания гидрологических и водохозяйственных характеристик, колебания которых ограничиваются некоторыми конечными пределами. С исследованиями подобных величин приходится иметь дело при расчетах водохранилищ, при композиционном методе гидрологического анализа и т. п.

В статье М. Ф. Срибного «Геоморфологические характеристики водосборов» изложены предложения автора относительно характеристик, которые необходимы при исследованиях и разработке методов расчета явлений высокого стока для количественного выражения различных геоморфологических параметров водосбора и речной сети.

В статье С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля «О распластывании волны высоких вод при продвижении по призматическому руслу» дан приближенный вывод аналитической зависимости, связывающей явление трансформации паводочной волны с формой гидрографа, шероховатостью русла и уклоном реки.

Статья Я. Д. Гильденблата «Некоторые вопросы, связанные с расчетами неустановившегося движения и оценкой располагаемых по напору пиковых мощностей гидроэлектростанции», основанная на большом опыте проектирования, имеет целью обеспечить внедрение в проектную практику исследований неустановившегося режима, широкому применению которых препятствуют трудоемкость расчетов и сложность математических построений.

Н. А. Лабзовский в статье «Расчет элементов волн на мелководье» предлагает приближенный способ определения элементов мелководных волн, основанный на теории волн бесконечно малой амплитуды на конечной глубине, с использованием эмпирических данных.

Сборник рассчитан на гидротехников, работающих в области проектирования, строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений, а также на научных работников соответствующих специальностей.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ

(под редакцией *Е. В. Близняка* и *К. И. Россинского*)

ОСНОВЫ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ, ВЫЗЫВАЕМЫХ НА РЕКАХ ИСКУССТВЕННЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ИХ РЕЖИМА

ВВЕДЕНИЕ

Согласно постановлению Совета Министров СССР от 12 сентября 1951 г. на Академию наук СССР, при участии Главного управления гидрометеорологической службы при Совете Министров СССР, была возложена разработка методики расчета русловых процессов, вызываемых на реках искусственным изменением их гидрологического режима.

Изменения гидрологического режима речных систем СССР является следствием осуществления широкой программы водохозяйственных мероприятий, включающей строительство крупных гидроузлов, образование больших водохранилищ, использование речной воды для орошения. Эти мероприятия отражаются на всех основных элементах гидрологического режима. Сток регулируется, высокие воды задерживаются в водохранилищах; из созданных запасов воды реки получают дополнительное питание в периоды маловодья. Плотины, образующие озеровидные бьефы, уменьшают скорость течения воды, в результате чего на значительных участках приостанавливается продвижение наносов. Волнение, развивающееся в водохранилищах, приводит к переработке их берегов, к изменению очертаний береговой линии и к частичному заполнению водоемов продуктами размыва. Сосредоточенный пропуск воды через водосбросные отверстия гидротехнических сооружений вызывает значительные местные деформации дна, образование глубоких размывов в нижнем бьефе. Все многообразные последствия изменений гидрологического режима необходимо правильно предвидеть, количественно оценивать и учитывать при гидротехническом строительстве.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Основы теории русловых процессов, происходящих в реках, были созданы в значительной степени трудами русских инженеров-гидротехников. В развитии и совершенствовании теории и в разработке методов инженерного расчета русловых процессов ведущее место принадлежит советским исследователям. Характерным для современного состояния советской науки в этой области является сочетание глубоких исследований, направленных на создание стройной системы общих теоретических представлений о природе процессов формирования русла, с разработкой методов и приемов, позволяющих предвидеть развитие этих процессов при изменении гидрологического режима и обеспечивающих возможность решения инженерных задач, выдвигаемых гидротехнической практикой.

Результаты исследования русловых процессов находят широкое применение при проектировании и строительстве гидротехнических сооружений; опирающиеся на эти исследования методические приемы позволили обоснованно подойти к оценке условий работы таких крупнейших сооружений, как Цимлянская плотина на Дону, Куйбышевская и Сталинградская плотины на Волге, Каховская плотина на Днепре, Мингечаурская плотина на Куре и другие.

Научно-исследовательские работы в области изучения руслового процесса ведутся в ряде научно-исследовательских и проектно-изыскательских организаций. Среди них нужно отметить работы следующих учреждений.

В Лаборатории русловых процессов Секции по научной разработке проблем водного хозяйства АН СССР впервые в Советском Союзе было начато лабораторное исследование естественного формирования русел. На основе этих работ предложена методика натурального моделирования русловых процессов. В Лаборатории проводятся работы по изучению турбулентности руслового потока и механизма движения наносов, а также по построению русловых зависимостей. На основании этих работ были сделаны выводы, имеющие большое значение для решения проблемы формирования русел.

Большое внимание усовершенствованию методики расчета общих и местных деформаций русел рек уделяется в Гидропроекте Министерства электростанций. Эта работа ведется в неразрывной связи с разработкой основных положений теории формирования речных русел. Разрабатываемые в Гидропроекте общетеоретические положения в настоящее время дают наиболее полное представление о процессах деформаций русел, сложенных легкоподвижными грунтами. Работа над методами расчета и теорией опирается на проводимые Гидропроектом обширные лабораторные и натурные исследования.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Работы Государственного гидрологического института (ГГИ) направлены главным образом на изучение морфологической стороны руслового процесса и на установление связи между транспортом наносов и русловыми деформациями. На основе таких зависимостей предполагается создать методы прогнозирования русловых переформирований в реках с измененным водным режимом. Кроме того, разработан метод расчета переформирования берегов водохранилищ, вызванного действием ветровой волны.

В лаборатории мостовых переходов Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного строительства и проектирования (ЦНИС) Министерства транспортного строительства на основе лабораторных и полевых исследований, а также анализа натурных материалов ведутся работы по изучению естественного руслового процесса на тех участках рек, которые находятся под воздействием мостовых сооружений. В работах лаборатории нашел применение и дальнейшее развитие метод натурального моделирования, предложенный М. А. Великановым. Для участков рек с мостовыми переходами этой лабораторией разработана методика качественного прогноза русловых деформаций на реках различного типа, методика количественного прогноза некоторых типов русловых деформаций, методика расчета местных деформаций, возникающих непосредственно у опор мостов, регуляционных сооружений и т. п.

В Центральном научно-исследовательском институте эксплуатации и экономики водного транспорта (ЦНИИЭВТ) Министерства речного флота ведутся исследования руслового режима в нижних и верхних бьефах крупных водохранилищ и разрабатываются мероприятия по улучшению судоходных условий. Ведутся исследования по изучению режима перекатов, извилин русла, общих условий устойчивости речного ложа, продольного профиля реки, исследования в области моделирования на размываемых и на жестких моделях, а также исследования по изучению гидравлики русловых потоков и, в частности, изучается связь рельефа водной поверхности с внутренними течениями. Исследования ведутся как в полевых, так и в лабораторных условиях.

Государственный институт проектирования на речном транспорте (Гипроречтранс) Министерства речного флота провел на Цимлянском водохранилище обширные изыскательские работы, в результате которых получены оригинальные материалы по переформированию берегов водохранилища и профиля береговых откосов.

Институт сооружений Академии наук Узбекской ССР ведет обширные натурные исследования, а также лабораторные и

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

теоретические работы по изучению закономерностей руслового процесса на устойчивых и блуждающих участках рек, по моделированию размываемых русел рек, исследует размыв в нижнем бьефе водозаборных узлов и водохранилищ, а также заиление взвешенными и занесение донными наносами верхних бьефов. В результате обработки и анализа накопленных данных выявлен ряд закономерностей руслового процесса, измененного воздействием гидротехнических сооружений, и получены расчетные зависимости и формулы для расчета устойчивых и блуждающих русел при регулировании рек, для моделирования размываемых русел рек по нелинейным зависимостям, для расчета заиления и занесения верхнего бьефа, для определения величины размыва в нижнем бьефе и др.

Среднеазиатский научно-исследовательский институт ирригации (САНИИРИ) ведет исследования транспортирующей способности каналов, устойчивости профиля русел с зарегулированным режимом, зимнего режима рек, каналов и гидроузлов. Разрабатывается также методика моделирования размываемых русел и расчет русловыправительных и защитных сооружений. Обобщены материалы исследований по местным размывам и получены различные расчетные формулы.

Всесоюзный научно-исследовательский институт гидротехники имени Б. Е. Веденеева (ВНИИГ) проводит исследования неразмывающих скоростей потока. Выявлено, что при мелкозернистых грунтах сказывается влияние вязкости. Исследуется вопрос о резком расширении потока при наличии водоворотной зоны и ведется теоретическое исследование вопроса о величине подъемной силы при срыве и движении твердых частиц. Большое внимание уделяется разработке методики моделирования местных размывов русла при мелкозернистых грунтах натуры с применением на модели легкоподвижных материалов.

В Водноэнергетическом институте Академии наук Армянской ССР выведено критериальное уравнение расхода наносов с двумя критериями подобия, а также проводятся теоретические работы по изучению циркуляции турбулентного потока при изгибе русла и транспортирующей способности циркуляционного потока.

В Грузинской ССР работы в области русловых процессов ведут различные научно-исследовательские институты и организации. В частности, в Институте энергетики Академии наук Грузинской ССР и Тбилисском институте железнодорожного транспорта проводятся теоретические исследования общих деформаций участков рек и занесения водохранилищ наносами, а также натурные исследования деформаций русел в нижних бьефах гидросооружений.

Институт гидрологии и гидротехники Академии наук Украин-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

ской ССР уделяет большое внимание изучению поперечной циркуляции. В институте разрабатывались принципы расчета поперечной циркуляции и распределения продольных скоростей на изгибе потока.

Всесоюзный научно-исследовательский институт водоснабжения, канализации, гидротехнических сооружений и инженерной гидрогеологии (ВОДГЕО) разрабатывает вопросы моделирования движения наносов на реках вблизи сооружений. Исследования проводятся с искажением и без искажения масштабов, с применением естественных и искусственных наносов.

Дагестанский филиал Академии наук СССР проводил натурные наблюдения над заносимостью водохранилищ на горных реках.

В Азербайджанском научно-исследовательском институте гидротехники и мелиорации (НИИГиМ) ведутся работы по изучению закономерностей руслового процесса на равнинных участках рек, по исследованию формирования прорезей при спрямлениях излучин рек, по изучению работы оградительных валов. В результате этих работ выявлены некоторые закономерности руслового процесса, дана методика проектирования и производства спрямления излучин рек.

Таков далеко не полный перечень организаций, занимающихся изучением руслового процесса.

Широкое изучение в СССР режима речных русел и механизма их формирования позволило разработать теоретические основы русловых деформаций и построить методы и приемы их расчета.

Настоящая работа подводит итоги современному положению в рассматриваемой области науки и намечает путь дальнейшего ее развития.

В основу исследований была положена подробная программа, выработанная Секцией по научной разработке проблем водного хозяйства АН СССР при участии представителей научно-исследовательских и проектно-изыскательских институтов. Для общего направления и увязки работ, выполняемых отдельными учреждениями, при Секции была организована Координационная комиссия по русловым процессам под председательством заслуженного деятеля науки и техники профессора доктора техн. наук Е. В. Близняка; обязанности ученых секретарей комиссии выполняли кандидат техн. наук К. Л. Попова и Н. С. Шарашкина. Наиболее сложные вопросы были обсуждены на всесоюзных научных совещаниях и семинарах.

Настоящая статья представляет собой отчет, составленный лауреатом Сталинской премии К. И. Россинским, лауреатом Сталинской премии кандидатом техн. наук И. А. Кузьминым, кандидатами техн. наук О. В. Андреевым, И. А. Ярославцевым и

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Н. Е. Кондратьевым по материалам следующих научно-исследовательских организаций: Секции по научной разработке проблем водного хозяйства АН СССР, Института гидрологии и гидротехники Академии наук Украинской ССР, Водно-энергетического института Академии наук Армянской ССР, Энергетического института Академии наук Грузинской ССР, Института сооружений Академии наук Узбекской ССР, Дагестанского ФАН СССР, Государственного гидрологического института, Центрального научно-исследовательского института экономики и эксплуатации водного транспорта Министерства речного флота (ЦНИИЭВТ), Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного строительства и проектирования Министерства транспортного строительства (ЦНИС), Всесоюзного научно-исследовательского института гидротехники имени Б. Е. Веденеева (ВНИИГ), Среднеазиатского научно-исследовательского института ирригации Министерства сельского хозяйства СССР (САНИИРИ), Всесоюзного научно-исследовательского института водоснабжения, канализации, гидротехнических сооружений и инженерной гидрогеологии (ВОДГЕО), Всесоюзного научно-исследовательского института гидротехники и мелиорации Министерства сельского хозяйства, Гидропроекта Министерства электростанций, Гипроречтранса Министерства речного флота, Тбилисского института железнодорожного транспорта и Тбилисского государственного университета.

При составлении отчета использованы как опубликованные, так и неопубликованные работы С. Т. Алтунина, А. Н. Ананяна, О. В. Андреева, А. И. Акаева, Е. В. Близняка, М. А. Великанова, С. Л. Вендрова, В. Н. Гончарова, С. А. Джамалова, И. В. Егиазарова, А. С. Зедгинидзе, А. В. Караушева, Н. К. Кондратьева, И. А. Кузьмина, И. И. Леви, Г. В. Лопатина, А. И. Лосиевского, В. М. Маккавеева, Н. И. Маккавеева, И. И. Мечитова, М. А. Мосткова, И. Я. Орлова, А. С. Офицерова, Б. А. Пышкина, И. Л. Розовского, Н. А. Ржаницына, К. И. Россинского, С. И. Рыбкина, С. В. Русакова, А. Д. Саваренского, Б. А. Фидмана, Н. Н. Федорова, Г. И. Шамова, И. А. Ярославцева, И. И. Якунина и др.

Были использованы также материалы совещания по русловым процессам, организованного в 1952 г. Главным управлением гидрометеорологической службы при Совете Министров СССР и Институтом географии АН СССР, и трех специальных совещаний, организованных Координационной комиссией в 1952, 1953 и 1954 гг.

Отчет утвержден Ученым советом секции по научной разработке проблем водного хозяйства АН СССР по докладу Е. В. Близняка, К. И. Россинского и Н. Е. Кондратьева.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Глава I

ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Методика прогноза деформаций речных русел должна строиться на основе закономерностей русловых процессов. Условия формирования речных русел весьма различны ввиду особенностей режима стока, специфики геологического строения бассейнов, рельефа местности и гидравлического режима отдельных рек. Несмотря на индивидуальные особенности отдельных водотоков, в формировании их русел имеются общие черты, которые позволяют наметить некоторые теоретические положения, применимые для русловых процессов на различных реках. Этим обобщающим закономерностям процесса посвящена настоящая глава.

Русло каждой реки под воздействием потока непрерывно изменяется. Рассматривая эти изменения, мы можем выделить процессы, существенно отличающиеся друг от друга по своей интенсивности.

На протяжении геологических эпох в преобразовании земной поверхности большую роль играли медленная эрозия континентов и сопровождающее ее понижение речных долин, а также аккумуляция наносов в низовьях рек при впадении в море, вызывающая обмеление прибрежных участков моря, образование дельт и медленное поднятие ложа рек. На равнинных реках процессы понижения речных долин протекают обычно столь медленно, что практически с ними можно не считаться. Горные реки в местах выхода на низменность иногда откладывают принесенный твердый материал настолько интенсивно, что поднятие русел становится заметным уже на протяжении относительно коротких промежутков времени и приобретает практическое значение. При этом повышение русла происходит не непрерывно, а перемежается с кратковременными периодами его понижения, вызванного задержкой в поступлении наносов.

Односторонне направленные деформации русел могут возникать также под влиянием нарушения естественного режима рек, вызванного водохозяйственными мероприятиями. В этом случае интенсивность деформаций может быть значительной, вследствие чего при решении гидротехнических задач учет русловых деформаций становится необходимым.

В естественном режиме русла в большинстве случаев основное значение приобретают многократно повторяющиеся деформации, которые представляют собой процесс чередования относительно быстро протекающих изменений плановых и профильных очертаний русла, в той или иной степени отклоняю-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

щихся от некоторого среднего многолетнего положения. Эта средняя величина в процессе вековых, односторонне направленных деформаций изменяется медленно. К таким процессам относятся развитие и отмирание речных излучин, продвижение следующих друг за другом гряд и т. п. Период, в течение которого русло, испытывающее подобные изменения, приблизительно возвращается к исходному положению, зависит от размеров реки и вида деформаций. Для поступательного движения невысоких гряд этот период измеряется часами, а для таких явлений, как развитие и отмирание меандр на крупных реках, — десятилетиями и даже столетиями. Особая категория повторяющихся деформаций русла связана с внутригодовыми изменениями гидрологического режима, отражающими смену времен года. Так, годовая периодичность отчетливо проявляется в состоянии перекатов, распределении глубин и т. п.

Речное русло деформируется в процессе взаимодействия жидкой и твердой сред. Основными факторами этого взаимодействия являются: 1) русловой поток с движущимися в нем наносами и 2) геолого-геоморфологическая обстановка процесса.

К второстепенным факторам, влияющим на русловой процесс, но проявляющимся в различных случаях неодинаково, относятся движение воздушных масс, растительность, ледотермические процессы и др.

Движение воды в речном потоке является тем активным фактором, который вызывает перемещение твердых частиц, формирующих ложе. Водный поток формируется под воздействием двух взаимосвязанных факторов: условий питания рек водой и гидравлических характеристик потока, определяемых геометрическими размерами и геологическим строением русла, от которых зависят гидравлические сопротивления. Если режим реки регулируется гидротехническими сооружениями, то гидравлические характеристики потока зависят также и от параметров этих сооружений и от порядка управления ими.

Гидрологический режим рек Советского Союза неодинаков. Так, реки Европейской части СССР характеризуются высокими весенними половодьями, вызываемыми снеготаянием; реки Средней Азии (Аму-Дарья, Сыр-Дарья) получают основное питание летом от таяния горных снегов; сток рек Дальнего Востока формируется преимущественно за счет летних муссонных дождей и т. д. Неодинаков и меженний режим различных рек, зависящий от влажности, продолжительности и суровости зимы, от вечной мерзлоты и т. д.

При исследовании гидравлического режима речного потока можно выделить осредненное движение и внутренние течения. Задачей изучения осредненного движения потока является

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

отыскание зависимостей, связывающих такие характеристики, как расход воды, средняя по сечению скорость, продольный профиль водной поверхности и т. п.

Для построения методики расчета русловых деформаций существенное значение имеет анализ общих форм движения речного потока. На основе этого анализа определяется изменение элемента гидравлического режима, предвычисление которого необходимо для суждения о деформациях русла.

При исследовании общих форм движения в современной гидравлике вводятся два вида осреднений: временное и пространственное. При гидравлических расчетах мы используем величины скоростей, осредненные за достаточно длительные промежутки времени, т. е. рассматриваем не действительные траектории частиц жидкостей, а лишь статистический результат множества реальных движений. При пространственном осреднении скорости течения, различные в разных точках потока, осредняются, и поперечное сечение потока рассматривается как одно целое. При этом гидравлическое исследование приводится к одноразмерной задаче, поскольку состояние потока в каждом сечении характеризуется одной величиной осредненной скорости и одной величиной уровня свободной поверхности.

В общем случае неустановившегося движения в основе решений одноразмерной гидравлической задачи лежат два гидравлических уравнения: уравнение динамического равновесия и уравнение неразрывности. Методика приближенного интегрирования этих уравнений достаточно разработана и подробно освещена в специальной литературе.

При решении некоторых задач линейные гидравлические характеристики, рассматриваемые классической гидравликой, становятся недостаточными. Появляется необходимость перейти от линейной задачи хотя бы к задаче плоской, позволяющей установить осредненные по вертикали направления и величины скоростей в каждом пункте акватории. Эта задача решается путем построения так называемого «плана течений». Подобное построение, впервые предложенное Н. М. Бернадским, представляет собой ценное дополнение к классической гидравлике, позволяющее исследовать многие явления, количественная оценка которых необходима для предвидения деформаций русла.

Основные виды внутренних течений речных потоков следующие: течение, проявляющееся вследствие разности между осредненными скоростями в различных точках живого сечения и средней скоростью потока; поперечная циркуляция; расхождение и схождение струй при расширении и сужении русла и турбулентное перемешивание. Первый из перечисленных видов течения получается из-за неравномерности распределения скоростей по глубине и ширине потока.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

В процессе формирования речных русел особенно большое значение имеет поперечная циркуляция, возникающая в тех местах, где частицы движущейся жидкости приобретают ускорения, направление которых в горизонтальной плоскости нормально к направлению поступательного движения потока. Проявляющиеся при этом инерционные силы компенсируются давлением, устанавливающимся в результате возникновения здесь поперечного уклона поверхности воды. При этом инерционные силы уравновешиваются только в целом по вертикали, в отдельных же точках вертикали равновесие не соблюдается, так как скорости течения, а следовательно, и инерционные силы у поверхности потока больше, чем в придонной его области. В результате этого у поверхности течение отклоняется от оси потока в направлении действия инерционных сил, в придонных же слоях — в направлении поперечного уклона, что создаст винтообразное движение воды. В проекции на плоскость, нормальную к общему направлению течения, винтообразное движение образует замкнутый ток — циркуляцию.

В реках циркуляция создается, во-первых, под действием центробежных сил на повороте русла. В поверхностных слоях вода движется к вогнутому берегу, а в придонных — к выпуклому. Вторая причина образования устойчивой поперечной циркуляции заключается в действии кориолисова ускорения, являющегося следствием вращения земли вокруг своей оси. Под воздействием кориолисова ускорения даже на прямолинейных участках рек возникает циркуляция, в процессе которой в северном полушарии поверхностные слои воды движутся к правому берегу, а придонные — к левому, независимо от ориентации течения реки. Циркуляция воды в реке возникает также при обтекании гряд, расположенных наискось к течению.

Механизм образования циркуляционных течений обусловливает тесную связь поперечных скоростей течения с рельефом водной поверхности. Изучению рельефа водной поверхности в местах возникновения циркуляционных течений посвящены исследования А. И. Лосиевского, А. И. Фидмана и других ученых. Труды Н. Е. Жуковского, А. Я. Миловича, М. В. Потапова, В. М. Маккавеева, А. К. Ананяна, И. Л. Розовского и других посвящены количественному анализу циркуляционных течений.

Наиболее полный математический анализ явления поперечной циркуляции на повороте русла в условиях установившегося режима принадлежит А. К. Ананяну. Однако конечные решения его сложны. На реках, при свойственных им малых отношениях глубины к ширине, установившаяся поперечная циркуляция

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

хорошо описывается более простым уравнением, полученным И. Л. Розовским.

Турбулентные пульсации представляют особый интерес с точки зрения анализа процессов руслообразования. Турбулентный обмен коренным образом меняет диффузионные свойства потока. Именно этим фактором определяется способность потока взвешивать твердые частицы.

Речные воды переносят большое количество твердых частиц — наносов. Наносы являются продуктом эрозии водосборного бассейна реки и состоят из частиц грунта, залегающих на поверхности бассейна, на дне и в берегах речной и овражной сетей бассейна. Наиболее крупные (руслоформирующие) фракции наносов составляются такими же частицами, из каких слагается речное дно. Более мелкие частицы взвеси в донных отложениях почти не встречаются. Эти фракции участвуют только в формировании поймы, откладываясь на ней в периоды половодий.

Механизм перемещения твердых частиц потоком жидкости можно достаточно ясно объяснить на основе современных представлений о турбулентности.

Твердые частицы перемещаются потоком либо путем перекатывания их по дну, либо во взвешенном состоянии. Частицы грунта, лежащие на дне, приходят в движение под воздействием гидродинамического давления, возникающего при обтекании зерен грунта потоком. Давление может быть разложено на сдвигающую силу, направленную по течению, и подъемную силу, направленную вверх. Пока подъемная сила не превышает веса частицы, последняя покоится или движется по дну только перекатыванием. Если же подъемная сила превосходит вес частицы, то частица отрывается от дна, как бы подпрыгивает. Такие отделившиеся от дна зерна грунта подхватываются восходящими токами жидкости и таким образом переходят во взвешенное состояние.

Частица, вовлеченная внутрь потока, движется по течению и, находясь под воздействием переменных по величине и направлению пульсационных скоростей, непрерывно совершает также и вертикальные перемещения, то поднимаясь, то опускаясь. В процессе своего движения частица может опуститься на дно и остаться на нем до следующего скачка.

Следовательно, содержание в потоке взвешенных наносов создается в результате более или менее длительного, но всегда временного пребывания в нем частиц грунта.

Содержание взвешенных наносов в реке неравномерно по глубине. Придонным слоям свойственна повышенная мутность; к поверхности она постепенно уменьшается. Особенно резкое увеличение мутности наблюдается в слое, непосредственно при-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

легающем ко дну. Неравномерность мутности тем больше, чем крупнее взвешенные частицы.

Теоретические исследования распределения взвешенных наносов по вертикали имеются в трудах М. А. Великанова, В. М. Маккавеева и др. Анализ распределения взвешенных насосов по глубине потока проводится в настоящее время двумя методами: путем анализа явлений переноса в турбулентной среде и путем учета работы, затрачиваемой потоком на взвешивание тяжелых частиц. Основы второго метода предложил М. А. Великанов.

Равнинным рекам свойственны небольшая мутность и относительно малая крупность наносов. Поэтому при исследованиях мутности равнинных рек можно пользоваться методом турбулентной диффузии.

Связь между мутностью воды и скоростями течения потока для естественных речных русел неоднозначна. В периоды (или в местах) размывов ложа эта связь отличается от соотношений, отвечающих периодам (или местам) аккумуляции наносов. Различие возникает вследствие изменения гранулометрического состава верхнего слоя донных отложений в процессе деформирования речного дна. Размыв сопровождается выносом относительно мелких частиц, что приводит к повышению крупности частиц, выстилающих дно. Напротив, в областях отложений наносов дно покрывается частицами, выпадающими из толщи потока, и вследствие этого уменьшается крупность зерен в верхнем слое дна. Соответственно в верхнем слое дна в первом случае уменьшается, а во втором случае увеличивается количество частиц, способных переходить во взвешенное состояние при данной величине взвешивающей силы. Поэтому придонная мутность в областях аккумуляции наносов оказывается более высокой, чем на размываемых участках. Так как содержание твердых частиц по всей глубине потока пропорционально придонной мутности, тот же вывод можно распространить и на среднюю по вертикали мутность.

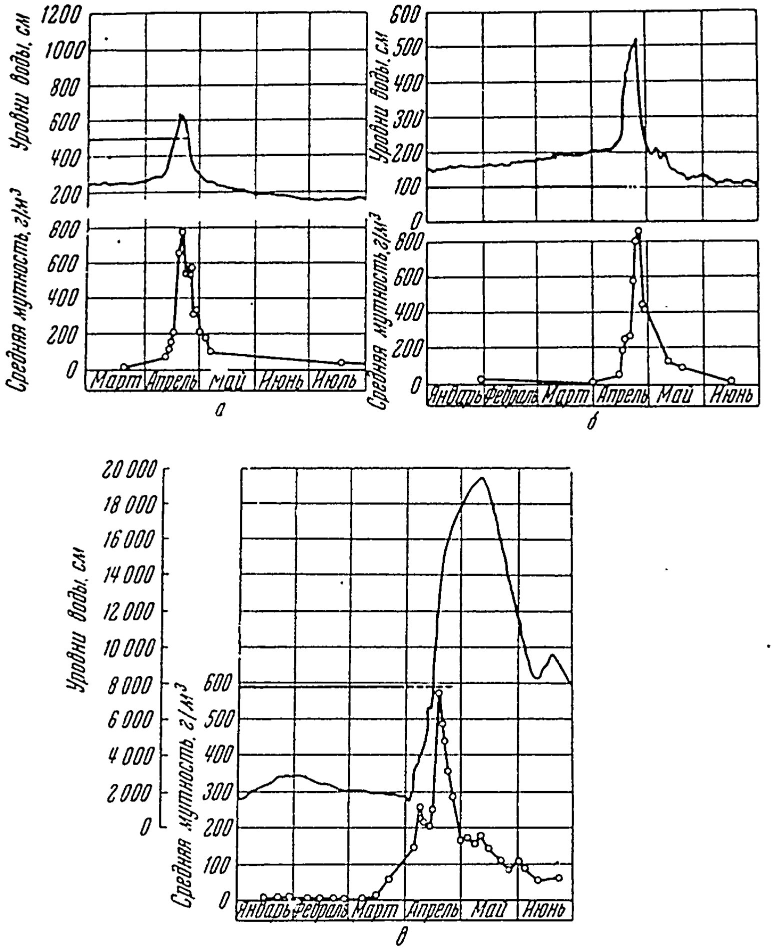
Большая часть твердого стока рек проходит в периоды половодий. Например, Волга в районе Самарской луки за время высоких вод проносит свыше 80% годового количества наносов. Изменение мутности за время половодья неодинаково на реках, различных по размерам и географическому положению, и зависит от особенностей формирования половодья и от качества продуктов эрозии водосборного бассейна. В качестве примера на фиг. 1 приведено годовое изменение мутности для рек Самары, Свияги и Волги, каждая из которых имеет свои специфические особенности формирования половодья.

Процессы формирования речных русел тесно связаны с особым видом перемещения наносов потоком — с движением так называемых гряд (заструг). Под этим названием понимаются

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

песчаные скопления, образующиеся на дне рек, русла которых сложены подвижными частицами. Не связанные между собой частицы грунта, входящие в тело отдельной гряды, участвуют в движении, общем для всей массы составляющих гряду



Фиг. 1. Годовое изменение мутности рек:

а — Самары (у с. Елшанки); *б* — Свияги (у с. Вырыпаевки); *в* — Волги (у с. Горно-Водяного)

частиц, что позволяет рассматривать их как единое целое. Гряда в разрезе имеет со стороны течения пологий выпуклый лобовой откос, плавно сопрягающийся с гребнем гряды, а с теневой стороны — крутой тыловой откос, переходящий в подвалье гряды вогнутой формы. Подвалье вышележащей гряды сопрягается с лобовым откосом нижележащей гряды.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

В зависимости от соотношения между глубиной и шириной потока, от скорости течения и от крупности частиц грунта гряды могут формироваться в виде барханных цепей, в виде длинных лент, вытянутых поперек реки под некоторым углом к течению, в виде полубарханов или побочней, примыкающих к берегам реки в шахматном порядке, и в виде осередков [1].

Как указывалось, речное русло является продуктом взаимодействия между речным потоком и подстилающим его грунтом. В ходе процесса взаимодействия создаются формы русла, отвечающие законам этого процесса.

Непосредственной причиной деформаций речных русел является нарушение баланса наносов. Если на некоторый участок русла поступает больше наносов, чем удаляется с него, то русло повышается; если же наносов поступает меньше, то русло размывается. В этом случае нарушается продольный баланс наносов и изменяется продольный профиль русла. Наблюдаются также случаи нарушения поперечного баланса наносов. При этом происходит изменение поперечного профиля, перераспределение глубин по ширине русла и перемещение его в плане.

Процессы, порождающие несоответствие между притоком наносов и транспортирующей способностью реки, возникают как по естественным причинам, так и в результате возведения гидротехнических сооружений.

Как уже отмечалось, на равнинных реках эти процессы в основном имеют периодический характер, за многолетние же периоды поступление и удаление наносов по длине реки практически балансируются. Иначе обстоит дело в горных районах. Здесь режим русла приобретает отчетливый отпечаток неуравновешенности. В горах реки, текущие с большой скоростью и перемещающие огромное количество наносов, врезаются в горные породы, образуя каньоны. По мере врезания уклоны горных рек уменьшаются, скорость течения падает, сокращается и сток наносов.

Выходя из гор, реки откладывают принесенный материал, и ложе их интенсивно повышается. Отложения наносов сосредоточиваются преимущественно в русле и на непосредственно прилегающей к нему местности. С течением времени эта полоса территории начинает возвышаться над уровнем более удаленных от русла участков, и река течет как бы замыкаясь в естественных, намытых ею же валах. В дальнейшем река прорывает эти валы и спускается с намытого ею возвышения в пониженные части долины, где образуется новое русло,

[1] Некоторые исследователи не объединяют барханы, побочни и осередки термином «гряда».

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

вновь начинающее подниматься, и т. д. Таким образом, река постепенно наращивает всю площадь низменности. Процесс повышения продолжается тысячелетиями, пока питание наносами не приходит в соответствие с транспортирующей способностью реки. Наращиваемая территория превращается тогда в пойму, свойственную равнинным рекам, а продольный профиль реки в пределах такого участка приобретает относительное равновесие и испытывает главным образом повторяющиеся деформации, перемещаясь по пойме. Примером своеобразного неустойчивого режима русла могут служить р. Кура в пределах Кура-Араксинской низменности, низовья рек Сулака, Терека, Риони и др.

Характер и интенсивность повторяющихся деформаций, а также тесно связанные с ними формы русла зависят от скорости течения, уклона речного потока и подвижности грунтов, слагающих дно и берега реки.

У рек, текущих в легкоподвижных сыпучих грунтах, в процессе взаимодействия жидкой и твердой сред вырабатываются закономерные формы русла, типичные не только для отдельных участков одной и той же реки, но и для многих рек, находящихся в сходных условиях. Там, где в русле реки, наряду с легкоподвижными, встречаются и малоподвижные грунты, формы речного русла в той или иной мере утрачивают типичность, приобретая некоторые специфические черты, свойственные слабодеформируемым речным участкам. Формы дна и берегов этих рек зависят преимущественно от относительной прочности различных участков ложа и имеют незакономерный, индивидуальный характер.

Анализ механизма простейшего случая взаимодействия между плоским, весьма широким турбулентным потоком жидкости и подстилающим его сыпучим подвижным грунтом, проведенный К. И. Россинским и И. А. Кузьминым, показывает, что устойчивая форма дна, устанавливающаяся в результате этого взаимодействия, представляет собой характерный подвижный рельеф, составленный перемещающимися друг за другом грядами [1].

По очертаниям в плане русла рек разделяются на прямолинейные (или слабоизогнутые), извилистые и разбросанные. На прямолинейных участках поверхность дна слагается из перемещаемых течением гряд, которые, как правило, размещаются в шахматном порядке и образуют при этом цепь следующих друг за другом перекатов.

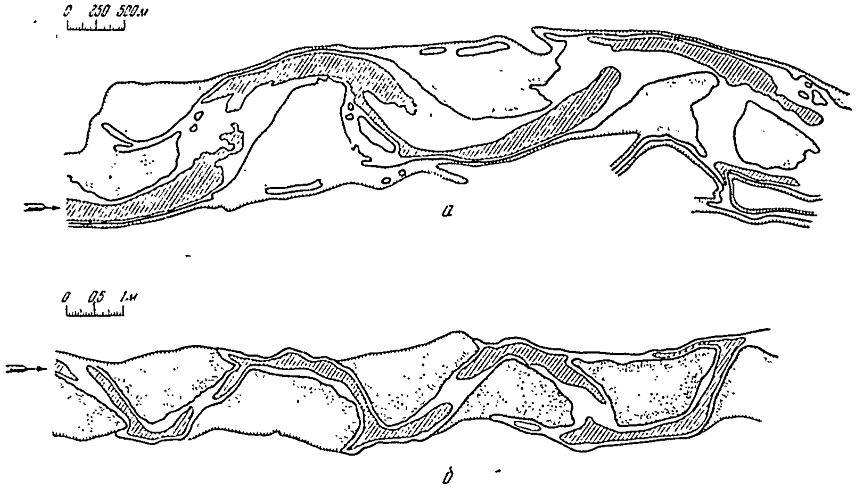
---

[1] Для грядового перемещения наносов О. В. Андреев и И. А. Ярославцев употребляют термин «структурно перемещающиеся скопления наносов».

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Повышенные части гряд, примыкая поочередно то к одному, то к другому берегу реки, образуют подвижные прибрежные отмели, являющиеся побочнями перекатов; пески, соединяющие два побочня противоположных берегов, составляют валы перекатов. На прямолинейных участках рек перекаты, сохраняя свои морфологические элементы, непрерывно перемещаются вниз по течению. На фиг. 2 показаны гряды-побочни, образовавшиеся на Днепре и на опытном русле Звенигородской русловой площадки Лаборатории русловых процессов Секции по



Фиг. 2. Гряды-побочни на прямолинейных участках:

а — р. Днепра; *б* — экспериментальной реки Звенигородской русловой площадки (1953 г.)

научной разработке проблем водного хозяйства АН СССР. Опытное русло имело ширину примерно 1 *м*.

Устойчивость грядообразного рельефа дна и закономерности возникновения гряд в условиях турбулентного потока, режим которого свободен от влияния побочных факторов, а также повсеместное распространение на реках перекатного рельефа приводят к выводу, что речному потоку, формирующему свое ложе в легкоподвижных грунтах, свойственна перекатная форма дна. Такая форма возникает спонтанно, в результате взаимодействия турбулентного потока с сыпучей средой, если нет посторонних факторов, искажающих нормальный ход руслообразующего процесса. Этим определяется первое положение теории формирования речных русел, сложенных легкоподвижным грунтом [1].

[1] Имеется и иная точка зрения на причины образования перекатов. Так, Н. И. Маккавеев и Н. А. Ржаницын полагают, что в реках образование перекатов обусловлено влиянием различных местных факторов:

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

На изогнутых речных участках, а также на крупных реках в местах прижима потока к правому коренному берегу, в отличие от рассмотренных прямолинейных участков, русло реки обычно имеет плесовый характер. Циркуляционное движение воды, возникающее под действием центробежных сил на закруглении (или под действием кориолисовых сил), отметает наносы к выпуклому берегу и придает поперечному сечению русла асимметричную форму. Под вогнутым берегом на всем протяжении излучины размещается глубокая часть русла, тогда как под выпуклым берегом непрерывно тянется прибрежная мель. Перекаты располагаются в местах перегибов русла.

Из сказанного вытекает второе положение теории руслообразования: плесовые участки русла, проложенного рекою в легкоподвижном материале, образуются только там, где имеются условия для развития в потоке общего по всей длине, постоянно направленного циркуляционного движения воды.

Существуют также разбросанные русла, отличающиеся обилием рукавов и протоков, разделенных между собой осередками и островами. Русла отдельных рукавов могут иметь перекатную или плесовую форму.

Каждой из трех основных форм русла в плане отвечает соответствующий тип руслового процесса: а) периодическое расширение, б) развитие излучин (меандрирование), в) блуждание.

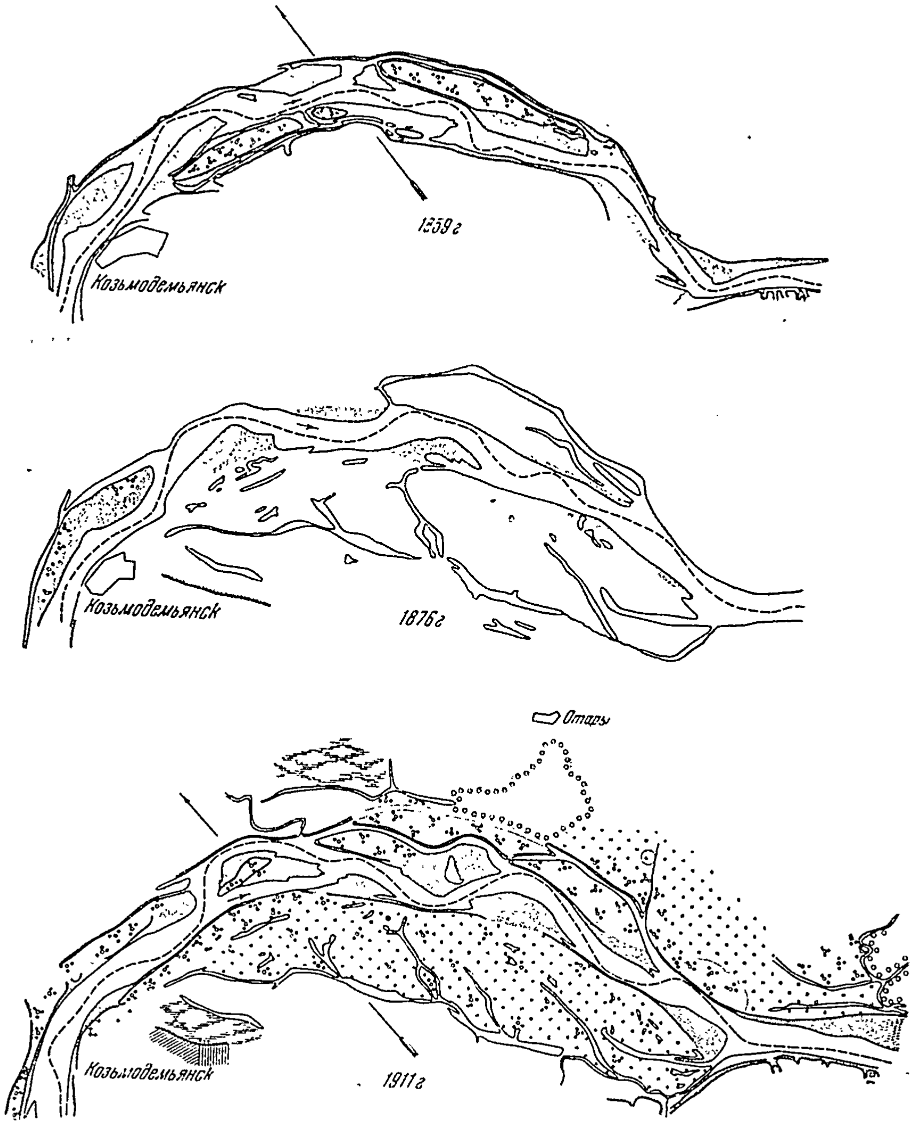
Тип процесса зависит от относительной подвижности ложа и берегов реки. На реках, где гряды, составляющие основной рельеф, быстро смещаются вниз по течению из-за подвижности донных отложений, а берега, напротив, по геологическим причинам или будучи закреплены корнями растений, подмываются не очень интенсивно, русло реки в процессе деформаций не успевает искривляться. По мере движения вниз по реке гряды прикрывают от размыва то одни, то другие участки берега и обусловливают этим более или менее равномерное по длине разрушение берегов, вследствие чего происходит постепенное расширение русла.

Длительный процесс расширения сменяется кратковременным процессом сужения русла: чрезмерно расширившись, поток отторгает побочни от одного из берегов и прокладывает себе прямое, сначала узкое русло. Отторгнутые побочни превращаются в осередки и затем в острова, разбивающие реку на рукава. Отторжение побочней показано на фиг. 3, на которой представлены совмещенные планы Волги в районе

впадения притока, изгиба русла, широкой односторонней поймы, выступа коренного берега и пр. Эти факторы действительно влияют на образование перекатов, однако они не являются обязательным условием формирования перекатного рельефа, возникающего и на тех участках рек, где нет никаких местных особенностей.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

г. Козьмодемьянска. В процессе заиления отмирающих рукавов острова соединяются с берегом, обычно противоположным



Фиг. 3. Совмещенные планы

1 — кустарник; *2* — песок; *3* — болото; *4* — луг; *5* — деревья;

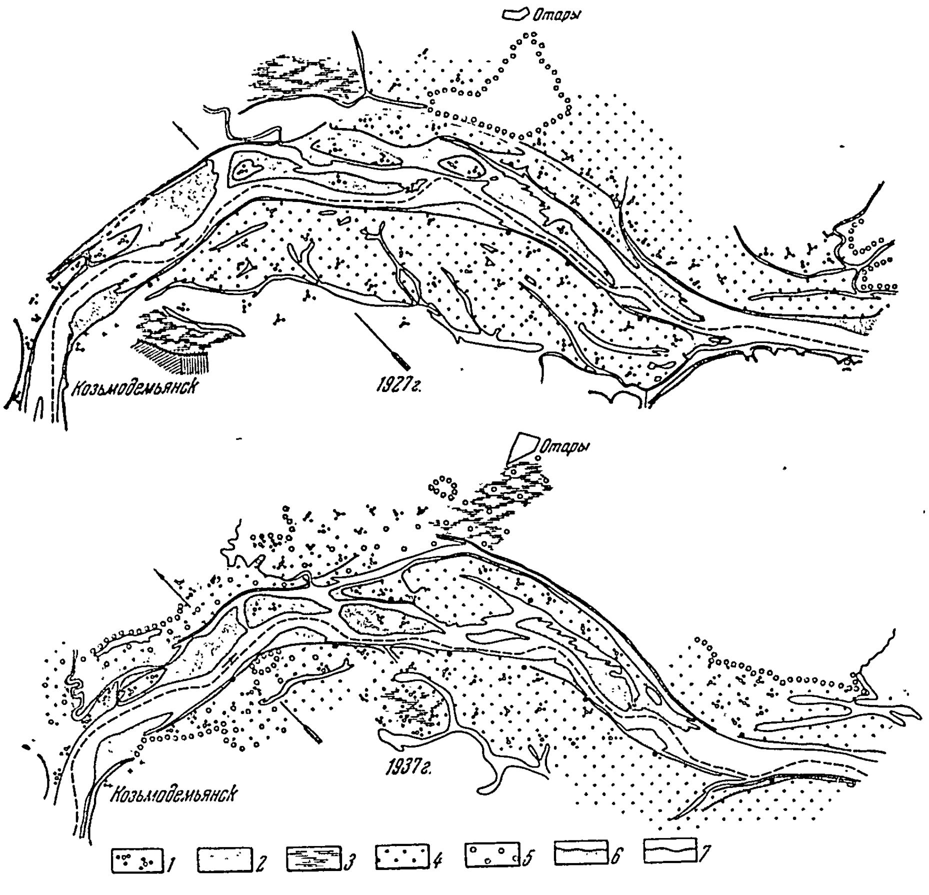
тому, от которого отделились побочни, и образуют новую линию берега, как бы выдвинутую в сторону реки. Этим завершается сужение русла, после чего возобновляется процесс расширения. Находясь в условиях периодического расширения, река сохраняет прямолинейные или слабоизогнутые

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2
Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

очертания участков. Процесс периодического расширения реки оставляет на пойме следы в виде прямолинейных или слабоизогнутых стариц.

В тех местах, где смещение песчаных масс (гряд основного рельефа) вниз по течению происходит медленно, а берега деформируются относительно быстро, русло успевает искривляться ранее, нежели надвигающиеся гряды смогут этому воспрепятствовать. В этом случае начинается развитие излучин — меандрирование реки, которое, так же как и процесс расширения, имеет периодический характер.



Волги в районе г. Козьмодемьянска:

6 — бровка коренного берега; *7* — бровка пойменного берега

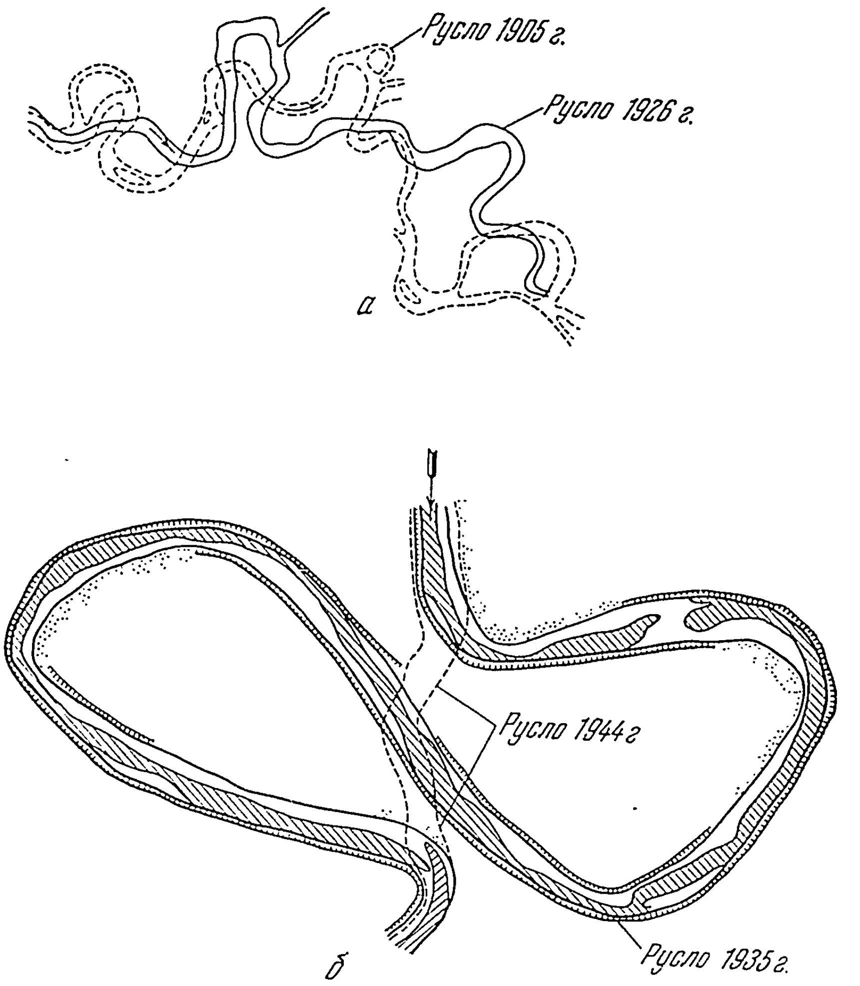
На фиг. 4, *а* показано изменение формы русла в плане при меандрировании реки (Сыр-Дарья).

Со временем излучины меандрирующей реки сильно искривляются, образуя почти замкнутые петли. Между началом и

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

концом таких петель остаются небольшие перешейки, которые прорываются потоком. Отрезанная при этом петля реки постепенно заполняется наносами и обращается в старицу. Образовавшееся при прорыве перешейка спрямленное русло покрывается прибрежными отмелями-грядами, и процесс искривления



Фиг. 4. Планы русел меандрирующих рек:

а — изменение формы русла в плане при меандрировании (Сыр-Дарья);
б — спрямление излучин при меандрировании (Кура)

начинается снова. Спрямление излучин при меандрировании (р. Кура) показано на фиг. 4, *б*.

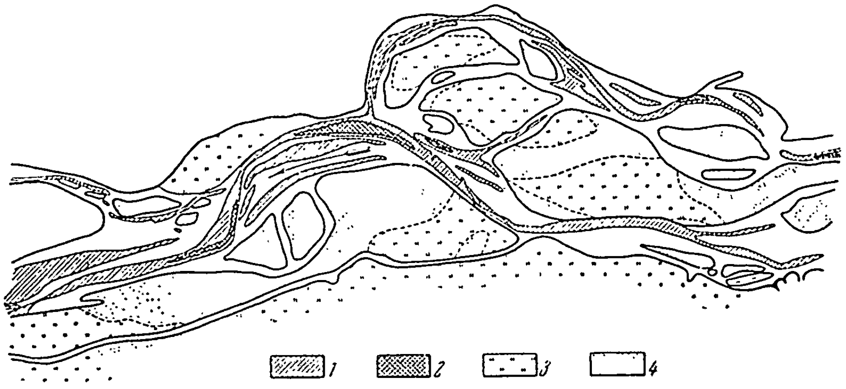
Блуждание наблюдается у рек с очень подвижными берегами. Русло реки, не будучи в состоянии сохранять правильную форму, сильно развивается в ширину. Гряды образуются пре-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

имущественно в виде осередков. Осередки развиваются в острова и разбивают реку на протоки, непрерывно меняющие свои очертания. План разветвленного русла блуждающей реки показан на фиг. 5.

Деформации естественных рек не всегда относятся к какому-либо одному из описанных выше типов. Геологические, гидрологические, а отчасти топографические и другие факторы придают строению русла индивидуальные черты, свойственные отдельным речным участкам. Однако на реках, протекающих в аллювии, везде можно проследить элементы рассмотренных выше трех основных повторяющихся процессов: периодического расширения, меандрирования и блуждания.



Фиг. 5. План русла блуждающей реки:

1 — глубина 3—5 *м*; *2* — глубина 5—7 *м*; *3* — отмели, поросшие травой; *4* — отмели незаросшие

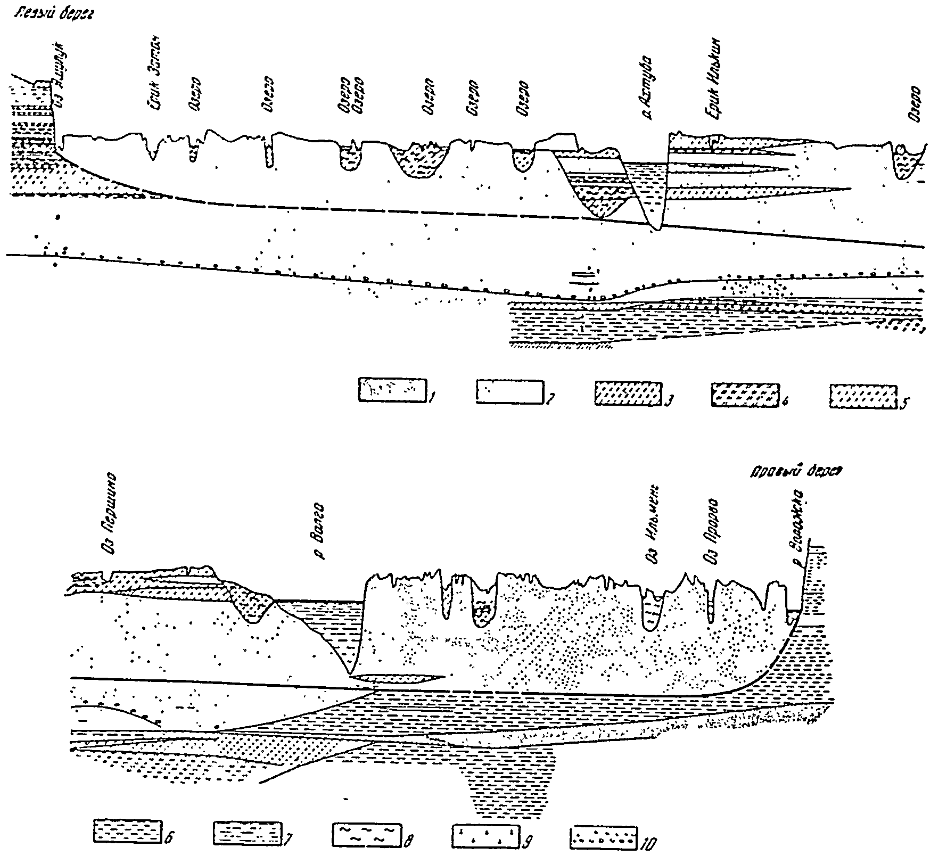
Процесс периодического расширения наблюдается преимущественно на крупных реках с песчаным дном и высокой поймой, верхняя часть которой сложена суглинками и покрыта растительностью. Таким рекам свойственны длительные половодья, наличие летних и осенних паводков. Геологический профиль реки с периодически расширяющимся руслом приведен на фиг. 6 (Волга в районе г. Енотаевска).

Развитию излучин способствуют малые масштабы реки, невысокие, песчанистые поймы с растительностью, гравелистые, галечные или глинистые включения в песчаных донных отложениях, короткие половодья и затяжные межени. В качестве примера геологического профиля меандрирующей реки на фиг. 7, *а* приведен геологический профиль Оки у г. Спасска. Реки, у которых берега и дно сложены одинаковым материалом, со слабой растительностью на поймах, с затяжными многопиковыми половодьями обладают склонностью к блужданию.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Участки русел рек сложного геологического строения, состоящие из грунтов различной степени подвижности, могут отличаться от участков русел, проложенных в аллювии, как формами дна, так и характером руслового процесса. Пример русла такой реки представлен на фиг. 7, *б* (Ока у Калуги).



Фиг. 6. Геологический профиль долины Волги в районе г. Енотаевска с периодически расширяющимся руслом:

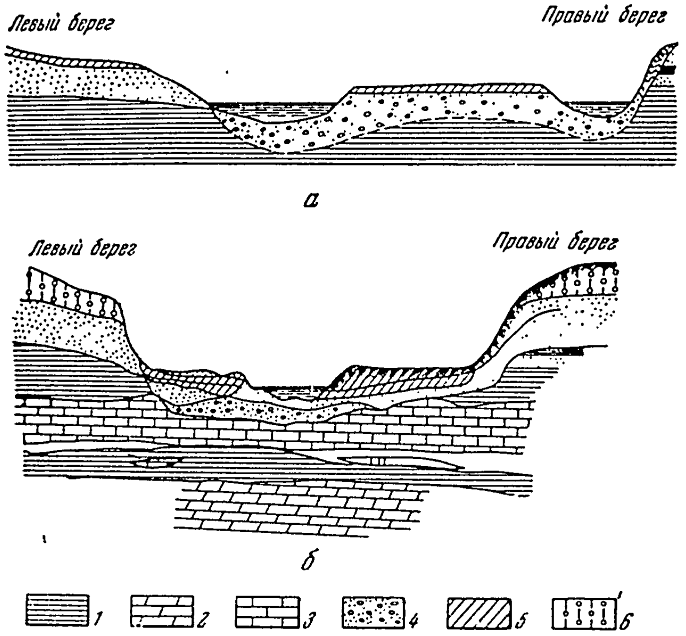
1 — песок мелкозернистый; *2* — песок среднезернистый; *3* — супесь легкая; *4* — супесь тяжелая; *5* — суглинок; *6* — глина; *7* — глинистость; *8* — иловатость; *9* — известковистость; *10* — гравий, галька

Если дно реки покрыто песчаными отложениями малой мощности, лежащими на плотных грунтах, побочни-гряды в реке могут не образовываться. В таких случаях часто встречается так называемая россыпь: грядовый рельеф, состоящий из большого числа относительно мелких барханов. В местах, где гряды-побочни образуются, они отличаются неполнотой форм и почти всегда неподвижны. На фиг. 8 показаны участки русла сложного геологического строения. На этой же фигуре

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

для сравнения показан участок русла с грядами-побочнями в чисто песчаном русле. Слабоподвижный грядовый рельеф наблюдается и при значительном содержании в песке гравелисто-галечного материала. В результате неподвижности побочней русла сложного строения развивают меандры даже в суглинистых или глинистых берегах.



Фиг. 7. Геологические профили:

а — русла меандрирующей реки (Ока у г. Спасска); *б* — русла сложного строения (Ока у Калуги): *1* — глины; *2* — мергель; *3* — известняк; *4* — песок с гравием галькой; *5* — суглинок; *6* — суглинок с валунами

Руслам сложного строения, вследствие затруднительности глубинной эрозии, присуще образование островов, медленно изменяющих свою форму и привязанных к определенным местам реки. Благоприятными для образования островов часто оказываются такие речные участки, на которых податливость берега размыву несколько меньше, чем выше и ниже лежащих участков, дно же реки подстилается плотным грунтом. На некоторых крупных реках с руслом сложного геологического строения имеются речные участки, покрытые системой островов, разбивающих реку на многочисленные рукава.

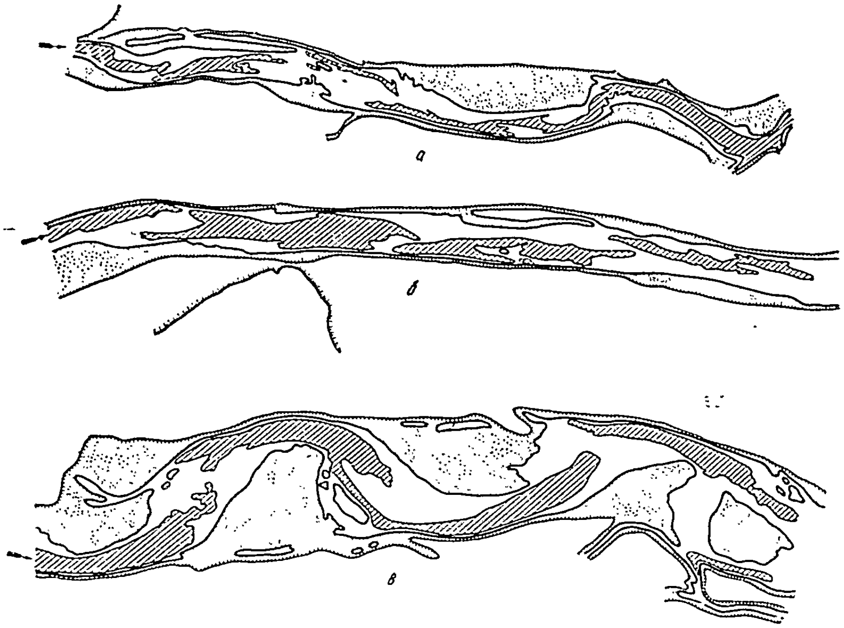
Реки, текущие в трудноразмываемых грунтах, в большинстве случаев не имеют поймы. Очертания русел таких рек в плане обычно совпадают с очертаниями речной долины и опре-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

деляются прежде всего особенностями топографии и геологического строения прилегающей местности. Перекаты располагаются вне связи с формой русла в плане и приурочены к местам, сложенным преимущественно наиболее трудноразмываемыми грунтами.

Размеры поперечного сечения речного русла зависят главным образом от расходов воды, уклона реки, ширины и высоты поймы, крупности донных отложений, а также от типа руслового процесса. Форма поперечного сечения русла в легкопо-



Фиг. 8. Планы участков русла сложного геологического строения (*а* — *б* — Белая) и участка легкоподвижного русла (*в* — Днепр)

движных грунтах связана с типом руслового процесса и регулируется поперечным балансом наносов. В ходе руслового процесса ширина и, соответственно, глубина русла все время изменяются, отклоняясь от некоторых средних значений. Наименьшие величины отношения ширины русла к его глубине свойственны меандрирующим рекам, причем эти величины тем меньше, чем круче излучины. Наибольшими величинами отличаются блуждающие реки. Реки, испытывающие периодические расширения русла, занимают промежуточное положение.

В труднонразмываемых грунтах соотношение поперечных размеров русла определяется относительной прочностью бортов и дна долины.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Математическая теория формирования поперечного профиля реки пока не разработана. Поэтому соотношение морфометрических элементов русла в настоящее время характеризуется различными эмпирическими зависимостями. Такие зависимости предложили М. А. Великанов, С. И. Рыбкин, Н. А. Ржаницын, С. Т. Алтунин и др. М. А. Великанов дает зависимости в общем виде, не раскрывая числовых значений параметров. Формулы С. И. Рыбкина, полученные в 1947 г., имеют числовые параметры, определенные для условий Верхней Волги и Оки. Параметры в формулах С. Т. Алтунина различны для рек различных категорий.

Глава II

ВЛИЯНИЕ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РЕКИ И ДЕФОРМАЦИИ РУСЛА

Возведение на реках гидротехнических сооружений является вмешательством в естественный режим реки, имеющим целью привести отдельные элементы этого режима в соответствие с потребностями народного хозяйства: создать перепад уровней, увеличить глубины, перераспределить речной сток при посредстве водохранилища и т. п.

Гидротехнические сооружения, изменяя режим рек, сами подвергаются воздействию речного потока и одновременно вызывают косвенные последствия, иногда противоречащие целевому назначению осуществляемых мероприятий.

Задачей научных исследований в области процессов формирования речного русла является разработка теоретических основ и методики расчета, обеспечивающих возможность предвидения и предвычисления изменений в режиме русла, возникающих в результате воздействия гидротехнических сооружений. Характер влияния, которое оказывают гидротехнические сооружения на режим реки в верхнем и нижнем бьефах, зависит от особенностей реки, размеров гидроузла и его народнохозяйственного использования.

В результате подпора уровень воды в верхнем бьефе гидроузла повышается: гидравлический режим бьефа утрачивает связь с естественными колебаниями расходов воды в реке и обусловливается работой гидротехнических сооружений. В хвостовых частях зоны подпора поднимаются только меженние уровни; наполнение же русла в половодные периоды остается близким к естественному. На фиг. 9 показано изменение уровней воды в самом водохранилище и в его хвостовой части.

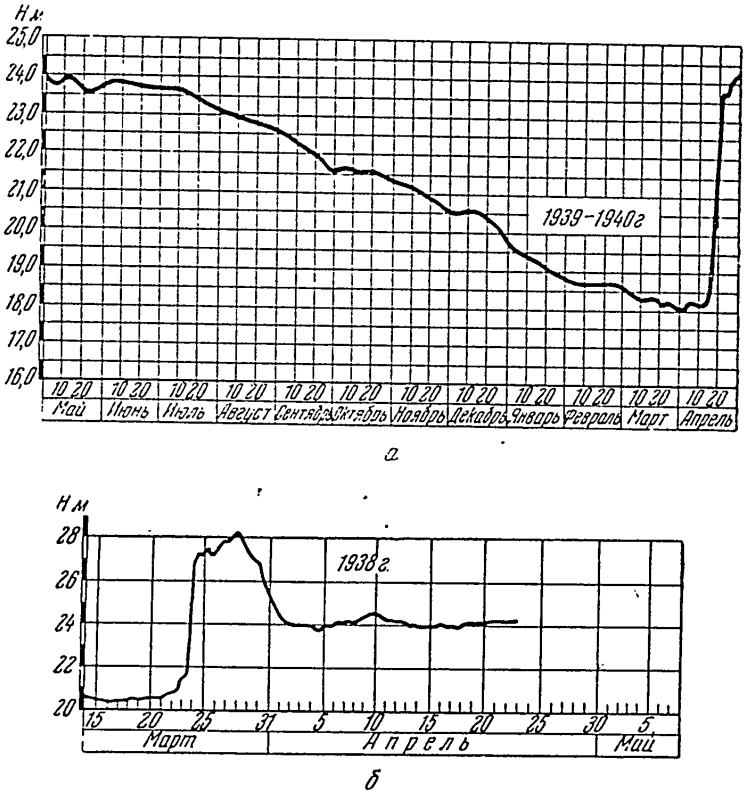
Скорости течения выше гидроузлов в той или иной степени уменьшаются в зависимости от величины подпора. С умень-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

шением скоростей падает способность реки транспортировать наносы. В пределах подпертого бьефа происходит выпадение наносов, что приводит к постепенному заилению водохранилища.

По мере повышения дна в верхнем бьефе изменяется положение подпорного уровня. От места первоначального выклинивания подпор распространяется вверх по течению, а вместе



Фиг. 9. Изменение уровней воды в водохранилище:
а — у плотины; *б* — в хвостовой части

с ним и деформации русла. Характер заиления водохранилища наглядно виден на фиг. 10 (продольный профиль водохранилища).

Подпор сказывается и на режиме перекатов. В зоне глубокого подпора жизнь перекатов замирает. В зоне переменного подпора в хвостах водохранилищ перекаты, выходя в периоды половодий из подпора, претерпевают присущие им бытовые переформирования. С убылью воды перекаты попадают в подпор; деформации их прекращаются, не успев завершиться до меженних пределов. Большинство перекатов намывается при

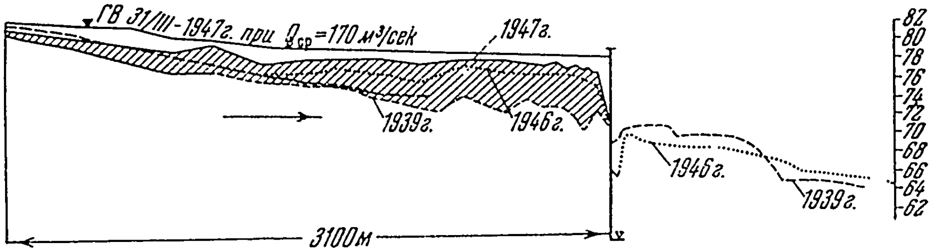
Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

повышении уровней воды. После спада половодья, попадая в подпор с повышенными отметками гребней, такие перекаты уменьшают судоходную глубину в концевых частях водохранилищ.

Значительные акватории, создающиеся в верхних бьефах гидроузлов на равнинных реках, способствуют развитию в ветреную погоду мощного волнения, разрушающего берега водохранилища. Переработка берегов ускоряет заиление водохранилищ и, увеличивая площади зеркала их, расширяет отчуждаемую под водохранилище территорию.

На участках рек, расположенных ниже гидроузла, в результате регулирования стока водохранилищами происходит перераспределение расходов воды. Очень емкие водохранилища, создаваемые крупными плотинами, могут полностью



Фиг. 10. Заиление водохранилища и размыв русла в нижнем бьефе плотины

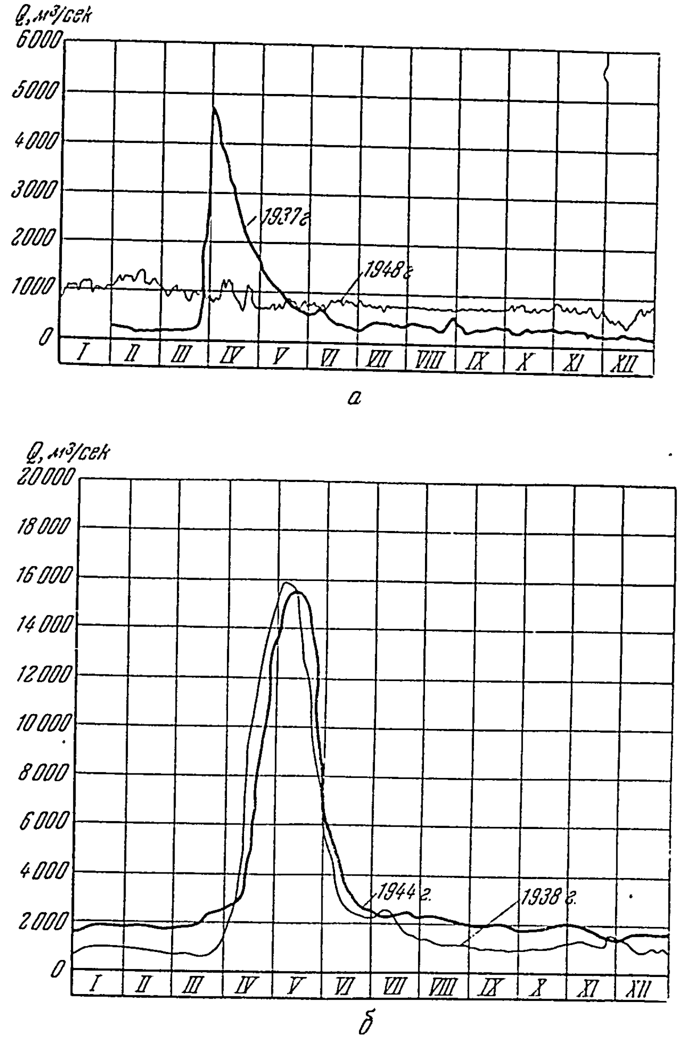
аккумулировать сток половодий. Ниже таких водохранилищ расходы воды в реке практически не изменяются в течение года или даже многолетних периодов. График фиг. 11, *а* показывает колебание расходов воды Волги у г. Ярославля в 1937 г., когда водохранилища еще не было, и в 1948 г., когда оно уже действовало. При более низких степенях регулирования водохранилище задерживает обычно сток половодий только маловодных лет. При значительных половодьях в результате частичной аккумуляции стока в нижнем бьефе сокращается лишь длительность половодий, максимальные же расходы остаются близкими к бытовым. В этом случае вследствие повышения межени уменьшается амплитуда колебания расходов воды. Уменьшение амплитуды колебания расходов воды после постройки водохранилища показано на фиг. 11, *б* (Волга у с. Вязовые).

Подпертые бьефы очень малой емкости не оказывают влияния на режим стока реки ниже подпорных сооружений. Уровни воды ниже гидроузлов изменяются в соответствии с изменением расходов.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Деформации русла на участках реки, расположенных непосредственно ниже гидроузла, обусловливаются преимущественно нарушением питания реки наносами. Недостаток насыщения, являющийся следствием отложения наносов в водо-



Фиг. 11. Колебания расходов воды Волги до постройки и после постройки водохранилища:

а — у Ярославля; *б* — у с. Вязовые

хранилище, восполняется размывом русла ниже подпорных сооружений. С течением времени размыв распространяется вниз по реке. С этим связано постепенное понижение уровня воды в нижнем бьефе гидроузла. Кроме того, непосредственно

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

за креплениями дна у сооружений возникают местные деформации, являющиеся результатом нарушения бытового распределения скоростей течения по глубине и ширине русла.

Ниже зоны размыва, в пределах которой река вновь насыщается наносами, на режим русла оказывает влияние перераспределение расходов воды во времени.

Перераспределение стока реки и связанное с ним изменение уровенного режима отражается, в частности, на состоянии перекатов. Характер некоторых перекатов меняется значительно, на большинстве же их наблюдаются только сезонные деформации, вызываемые колебаниями расходов и уровней воды в реке. Высокое стояние зарегулированных меженних уровней обусловливает повышение гребней перекатов.

Регулирование стока влияет также на процесс периодических деформаций русла. Во-первых, изменяется скорость этих переформирований; во-вторых, при очень длительном воздействии нового гидрологического режима возможно изменение и типа процесса.

Глава III

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ПРОГНОЗА РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

При строительстве гидротехнических сооружений возникает множество задач в области прогнозирования режима русла. Различный характер этих задач обусловливает многообразие методов их решения. Нет единого метода даже для прогноза общих процессов формирования русла, так как в различных случаях должны освещаться разные стороны этих процессов, требующие и разного подхода.

Существующие методы прогноза можно разделить на три группы, отвечающие принципиально различным путям решения задачи: 1) методы теоретического анализа и расчета, 2) методы моделирования, 3) комбинированные методы, соединяющие расчет и моделирование.

Методами теоретического анализа и расчета в современной практике гидротехнического строительства решаются следующие задачи:

1. Оценка изменений планового очертания русла в ходе естественного руслового процесса, а также при воздействии гидротехнических сооружений на режим реки.

2. Прогноз возможных изменений речных глубин в результате нарушения общего баланса твердого стока при создании подпертых бьефов.

3. Оценка возможных изменений отдельных морфометрических характеристик русла под влиянием нарушения со-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

оружениями общей гидравлики речного потока или регулирования стока.

4. Выяснение возможных изменений искусственно создаваемых русел.

Оценка изменения плановых форм русла под влиянием гидротехнических сооружений необходима для того, чтобы установить, не угрожают ли русловые деформации нормальной работе сооружений, входящих в состав гидроузла, а также населенным пунктам и хозяйственным объектам, расположенным на берегах реки, в зоне влияния гидротехнических сооружений, и др. При решении рассматриваемых задач требуется установить не только характер русловых деформаций, но и скорость их развития.

Теоретическое решение задачи об изменении плановых форм русла на речном участке большего или меньшего протяжения затрудняется в настоящее время, вследствие недостаточной изученности некоторых явлений, входящих в процесс формирования речного русла.

Поэтому единственным проектным методом решения задачи является прогноз плановых деформаций русла на основе анализа бытовых его переформирований.

Этот метод базируется обычно на двух основных предположениях:

1) русло в заданных проектных условиях сохраняет тот же тип процесса, что и в бытовых условиях, претерпевая изменения лишь вблизи сооружений;

2) интенсивность процесса, наблюдаемая в бытовых условиях в многолетнем периоде, сохраняется и в проектных условиях или меняется в том же соотношении, что и твердый сток.

Эти положения тем ближе к действительности, а метод тем эффективнее, чем меньше режим реки изменен сооружениями. В качестве исходного материала необходимо иметь данные, характеризующие бытовые переформирования русла. Для этого лучше всего иметь набор карт исследуемого участка реки разных лет съемки за достаточно длительный период.[1] При сопоставлении карт устанавливаются направление процесса и его интенсивность. Если период съемок недостаточен для освещения полного цикла переформирований, то недостающие звенья процесса восполняются на основании теоретических соображений, основанных на механизме переформирований.

При отсутствии съемок за длительный период можно судить о процессе по топографическому материалу, отражающему только современное состояние реки. В этом случае режим русла устанавливается также по теоретическим соображениям,

[1] Большую ценность имеют материалы аэрофотосъемки.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

согласно которым форма русла связана с определенным типом процесса, а также по геоморфологической обстановке (положение русла по отношению к коренным берегам, форма стариц и т. п.). Интенсивность же процесса устанавливается по аналогам.

Зная современную форму русла и тип руслового процесса (характер и направление перемещений русла), а также его интенсивность, можно получить представление о вероятных деформациях русла в будущем. При этом анализ бытовых переформирований русла должен дополняться теоретическим анализом возможных деформаций русла под воздействием сооружений. Основой для такого анализа служат закономерности руслового процесса, а также прогноз возможных изменений русла реки в результате нарушения баланса наносов.

Нарушение сооружениями общего баланса твердого стока вызывает прежде всего изменение положения дна реки, т. е. глубинные деформации русла. Примером глубинных деформаций служат заиление водохранилищ, общий размыв дна в нижнем бьефе гидроузлов и т. п.

Глубинные (высотные) деформации русла определяются методом баланса твердого материала. Этот метод заключается в совместном рассмотрении на расчетном участке реки уравнения движения жидкости и уравнения баланса твердого материала. Уравнение баланса представляет собой равенство разности объемов наносов, поступающих в пределы данного участка потока и уходящих за его пределы, объему деформаций дна в пределах этого же участка. В дифференциальной форме уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial p}{\partial l} + \gamma_{н} B \frac{\partial z}{\partial t} = 0, \qquad (1)$$

где p — весовой расход наносов;
l — горизонтальные расстояния;
B — ширина реки;
z — расстояние от дна до условной плоскости;
t — время;
$\gamma_{н}$ — объемный вес наносов в отложениях.

М. А. Великанов, И. И. Леви и М. А. Мостков, выражая расход наносов через гидравлические элементы потока, находят совместное решение уравнения движения жидкости и уравнения баланса твердого материала. Такой подход, позволяющий получать решения задачи в окончательном виде, применим в тех случаях, когда возможна схематизация живых сечений речного потока в виде более или менее однообразного поперечного профиля на достаточно большом протяжении реки.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

При незначительной длине исследуемого участка реки, когда можно пренебрегать изменениями уровня свободной поверхности по сравнению с деформациями дна, задача может быть ограничена решением одного уравнения баланса твердого материала, применяемого к каждой струйке в отдельности или к потоку в целом. К задачам такого типа относится определение размыва дна нижнего бьефа гидроузла на участке резкого расширения и определение деформации русла на участке реки, стесненном перемычками.

Когда необходимо учитывать неоднородность геологического строения ложа водотока (ограниченность толщи аллювия, включение в него крупного материала, образующего естественную отмостку, и т. п.) и изменчивость поперечных сечений по длине реки, решение указанной выше системы уравнений может быть получено путем попеременного применения на расчетном участке уравнения движения и уравнения баланса наносов, решаемых в конечных приращениях.

Уравнение баланса в конечных приращениях приводится к виду

$$\frac{p_1 - p_2}{\gamma_H} \Delta t = W, \qquad (2)$$

где p_1 — весовой расход наносов, поступающих на заданный участок;

p_2 — весовой расход наносов, выходящих за его пределы;

W — объем деформаций дна;

Δt — расчетный интервал времени.

В зависимости от характера задачи, деформации дна можно находить путем осреднения их по ширине русла (линейная задача) или же, при необходимости судить о распределении деформаций поперек реки, с осреднением только по части ширины (плановая задача).

В первом случае исследуемую часть реки разбивают по длине на элементарные расчетные участки, сечения которых схематизируются. Определение деформаций производят последовательно, от сечения к сечению. Расчет ведут для отдельных отрезков времени, в течение которых расходы и уровни воды считаются неизменными.

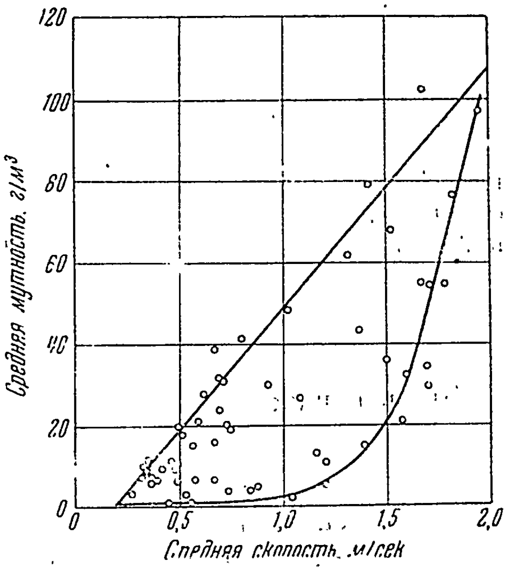
Расход взвешенных наносов в каждом сечении определяется произведением расхода воды Q на среднюю мутность потока $s_{ср}$, которую находят по эмпирическим связям, устанавливающим зависимость средней мутности от гидравлических элементов потока.

Подобные зависимости должны строиться по данным натурных наблюдений за мутностью реки при разных расходах воды. Пример зависимости между средним насыщением потока

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

наносами руслоформирующей фракции и скоростью течения для Волги показан на фиг. 12. Поле точек, полученных в результате непосредственных измерений, ограничено двумя линиями. Верхняя линия соответствует повышенной мутности в условиях отложения наносов, нижняя характеризует условия размыва. Зависимость средней мутности от скорости течения необходимо устанавливать отдельно для более крупных руслоформирующих фракций наносов и отдельно — для остальных, более мелких наносов. При расчетах заиления водохранилищ иногда возникает необходимость находить такие зависимости для трех градаций наносов по фракциям и более.



Фиг. 12. Зависимость между средним насыщением потока наносами руслоформирующей фракции и скоростью течения для Волги

В качестве аргумента при построении таких зависимостей можно принимать не только скорость течения, но и безразмерные параметры, включающие гидравлические характеристики потока и характеристики наносов. Одним из таких параметров может служить рекомендуемое М. А. Мостковым соотношение $\frac{ui}{w}$. Здесь и ниже приняты следующие обозначения: u — средняя по вертикали скорость потока; i — уклон водной поверхности; w — гидравлическая крупность наносов.

При отсутствии данных для построения натурных связей ориентировочно можно вычислять мутность по формуле Г. В. Лопатина (применительно к отдельным фракциям наносов) или по более сложным методам А. В. Караушева.

Формула Г. В. Лопатина построена по материалам наблюдений на реках за мутностью и связывает среднюю мутность речного потока $s_{ср}$, представляющую собой отношение веса наносов к объему воды, с гидравлической крупностью наносов w и средними гидравлическими элементами в расчетном створе

$$s_{ср} = \frac{4H^{0,5}i}{n^2 w} = \frac{4ui^{0,5}}{nw}\ г/м^3. \qquad (3)$$

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Здесь и ниже приняты следующие обозначения: H — средняя глубина потока, которая в формуле (3) выражается в метрах; n — коэффициент шероховатости.

Для ориентировочных расчетов могут быть использованы также формулы И. В. Егиазарова, М. А. Великанова, Е. А. Замарина и А. Н. Гостунского. Числовые параметры этих формул необходимо в каждом отдельном случае корректировать в соответствии с конкретными условиями.

Формула И. В. Егиазарова, являющаяся безразмерной, имеет вид

$$s_{ср.\,в} = 0{,}015 i^{1/2} \frac{1}{f_0 a} \frac{Ri}{d} \left(1 - f_0 a \frac{d}{Ri}\right), \qquad (4)$$

где $S_{ср.\,в}$ — средняя весовая мутность, представляющая собой отношение секундных расходов наносов и воды на единицу ширины потока и определяемая из соотношения

$$s_{ср.\,в} = \frac{q_н}{\rho q_в}.$$

Здесь и ниже приняты следующие обозначения:

$$a = \frac{\gamma_н - \gamma}{\gamma};$$

$q_н$ — секундный расход наносов на единицу ширины потока в весовых единицах с учетом архимедовой силы;

$q_в$ — объемный секундный расход воды на единицу ширины потока в объемных единицах;

$\gamma_н$ и γ — соответственно удельный вес наносов и воды;

f_0 — коэффициент сопротивления русла при трогании частиц наносов;

d — средний диаметр частиц наносов;

R — гидравлический радиус.

И. В. Егиазаров считает возможным применять свою формулу при наличии крупных фракций наносов.

Формула М. А. Великанова имеет вид:

$$s_{ср.\,об} = A \frac{u^3}{gHw}, \qquad (5)$$

где $s_{ср.\,об}$ — средняя объемная мутность, равная отношению объема наносов к объему воды;

g — ускорение силы тяжести;

A — коэффициент пропорциональности.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Формулы Е. А. Замарина имеют вид:

$$s_{ср} = 0{,}022\left(\frac{u}{w}\right)^{3/2}\sqrt{Ri}\ кг/м^3 \qquad (6а)$$

при $0{,}002 \leqslant w \leqslant 0{,}008$ *м/сек*;

$$s_{ср} = 11\, u\sqrt{\frac{uRi}{w}}\ кг/м^3 \qquad (6б)$$

при $0{,}0004 \leqslant w \leqslant 0{,}002$ *м/сек.*

Формула А. Н. Гостунского имеет вид

$$s_{ср} = 3300\frac{ui}{wC} = 3300\frac{n^3u^3}{H^{3/2}w}\ кг/м^3, \qquad (7)$$

где C — коэффициент Шези; средняя скорость потока u и гидравлическая крупность w выражены в *м/сек.*

Приведенные формулы для однородных по составу наносов дают однозначную связь между мутностью потока и гидравлическими характеристиками потока. На естественных реках по причинам, указанным выше, эта связь в большинстве случаев неоднозначна. Поэтому при уточнении параметров, входящих в формулы, по данным наблюдений за мутностью на реках желательно пользоваться фактическим материалом, относящимся к различным фазам годового цикла жидкого стока.

При расчете занесения водохранилищ, наряду со взвешенными наносами, необходимо учитывать и донные наносы, расход которых может быть вычислен по формулам Г. И. Шамова, И. И. Леви, В. Н. Гончарова или по формуле А. Шоклича, теоретически обоснованной М. А. Мостковым.

По Г. И. Шамову расход донных наносов равен

$$P = 0{,}95\sqrt{d}\left(\frac{u}{u_0}\right)^3(u - u_0)\left(\frac{d}{H}\right)^{0{,}25}\ кг/м\ сек, \qquad (8)$$

где u_0 — скорость трогания частиц.

По формуле И. И. Леви расход донных наносов

$$P = 0{,}002\left(\frac{u}{\sqrt{gd}}\right)^3(u - u_0)\left(\frac{d}{H}\right)^{0{,}25}. \qquad (9)$$

По формуле В. Н. Гончарова расход донных наносов

$$P = \frac{1+\varphi}{500}u_н d\left(\frac{u^3}{u_н^3} - 1\right)\left(\frac{u}{u_н} - 1\right)\ кг/м\ сек, \qquad (10)$$

где $u_н$ — непередвигающая скорость, определяемая по формуле

$$u_н = \lg\frac{8{,}8H}{d}\sqrt{\frac{2g(\gamma_н - \gamma)d}{3{,}5\ \gamma}}. \qquad (10а)$$

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Здесь d — средняя крупность частиц наносов, определяемая В. Н. Гончаровым как диаметр равнообъемного шара.

Входящий в выражение (10) параметр φ определяется по формуле

$$\varphi \approx 1{,}25 \frac{u_\Delta}{w},$$

где u_Δ — местная скорость в условиях сдвига.

Формула А. Шоклича имеет вид

$$P = \frac{7000}{\sqrt{d}} i^{3/2} (q - q_0) \text{ кг/м сек}, \quad (11)$$

где

$$q = \frac{0{,}00001944\, d}{i^{4/3}}.$$

Диаметр частиц наносов d выражен здесь в миллиметрах. Зависимость такого же вида получена теоретическим путем М. А. Мостковым.

Параметры, входящие в формулы для донных наносов, в конкретных случаях следует уточнять по данным натурных наблюдений или по сведениям о занесении существующих водохранилищ, которые могут служить аналогами для расчетного случая. После того, как по расчетным сечениям установлены расходы наносов, находят среднюю линейную величину деформации (намыв или размыв) для участка

$$\Delta z - \frac{G_1 - G_2}{\gamma_н F} \Delta t, \quad (12)$$

где Δz — среднее приращение отметки дна в пределах участка;

F — площадь дна в тех же пределах.

Если Δz получается больше 0,1% от глубины потока H, то расчетную ступень времени разбивают на более короткие интервалы.

При исследовании деформаций по длине и ширине реки расчет дополняется построением плана течений, методика которого предложена Н. М. Бернадским и усовершенствована Б. В. Проскуряковым, А. В. Караушевым, Н. А. Ржаницыным и М. П. Кожевниковым.

При построении плана течений поток по ширине реки разделяют на ряд струй, несущих по длине постоянный расход воды. Границы между струями устанавливаются при помощи уравнения Бернулли, составленного применительно к выделенным струям, и уравнения поперечного равновесия потока.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

При наличии плана течений деформации вычисляются отдельно для расчетных участков каждой струи. При этом в местах искривления струй в баланс вводится величина обмена наносами между соседними струями. Для определения поперечного расхода наносов необходимо знать скорости поперечной циркуляции и распределение наносов по глубине потока.

Скорости поперечной циркуляции следует вычислять по формуле, полученной И. Л. Розовским:

$$u_r = \frac{1}{\varkappa^2} u \frac{H}{r} \left[f_1(\eta) - \frac{\sqrt{g}}{\varkappa C} f_2(\eta) \right], \qquad (13)$$

где u_r — радиальная составляющая скорости;
r — радиус закругления;
η — относительная глубина, отсчитываемая от дна;
C — коэффициент формулы Шези;
$\varkappa$ — постоянная Кармана, которая для речных русел изменяется в пределах 0,30—0,55;
$f_1(\eta)$ и $f_2(\eta)$ — графически заданные функции.

Распределение наносов по глубине потока при стационарном режиме по диффузионной теории в предположении о распределении скорости по логарифмическому закону определяется соотношением

$$s = s_a \left[\frac{1-\eta}{\eta} \cdot \frac{a}{1-a} \right]^{\frac{w}{\varkappa \sqrt{gHi}}}. \qquad (14)$$

Здесь s — мутность на относительном расстоянии от дна $\eta = \frac{y}{H}$;
y — расстояние от дна;
s_a — придонная мутность при $\eta = a$.

Метод баланса твердого материала позволяет не только установить величину деформаций, но и проследить ход их во времени. Применение метода баланса твердого материала несколько ограничивается тем, что этот метод не дает возможности при современном развитии методики вводить в баланс твердого материала расход наносов, являющийся результатом размывов берегов. Поэтому для расчетов размывов в нижнем бьефе метод пригоден лишь постольку, поскольку можно не считаться с дополнительным поступлением наносов от размывов берегов. Применение этого метода для крупных равнинных рек ограничивается в большинстве случаев расчетным сроком около 20 лет. При анализе деформаций за более длительные сроки следует учитывать возможные искажения результатов.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Вопрос о применении метода баланса твердого материала для оценки изменения отдельных морфометрических характеристик русла разрабатывается О. В. Андреевым и И. А. Ярославцевым в ЦНИС. Задача в этом случае сводится к расчету деталей рельефа. Для небольших по протяженности участков русла это можно выполнить, вводя в расчет неравномерность распределения элементарных расходов влекомых наносов по ширине русла, связанную с грядовым перемещением последних.

В настоящее время при решении подобных вопросов часто применяют эмпирические зависимости между гидравлическими и гидрологическими характеристиками потока и размерами отдельных элементов русла. К таким задачам относится решение вопроса о судоходных глубинах в нижнем бьефе в условиях зарегулированного стока, определение размывов на мостовых переходах и т. д.

Для оценки судоходных условий основной интерес представляет режим глубин на гребнях перекатов. Глубины на перекатах устанавливаются обычно на основании связей между отметками гребней перекатов и уровнями воды в реке. Связи строят по данным натурных наблюдений. В тех случаях, когда на реке применяется землечерпание на перекатах, судоходные глубины ставятся в зависимость не только от уровня воды (или расхода воды), но и от объема эксплуатационного землечерпания. Например, для учета заносимости землечерпательных прорезей К. И. Российский и И. А. Кузьмин построили график (фиг. 13), выражающий зависимость между скоростью потери глубины в прорези и расходом воды. Аналогичным образом можно построить график, выражающий зависимость между скоростью потери глубины и скоростью течения.

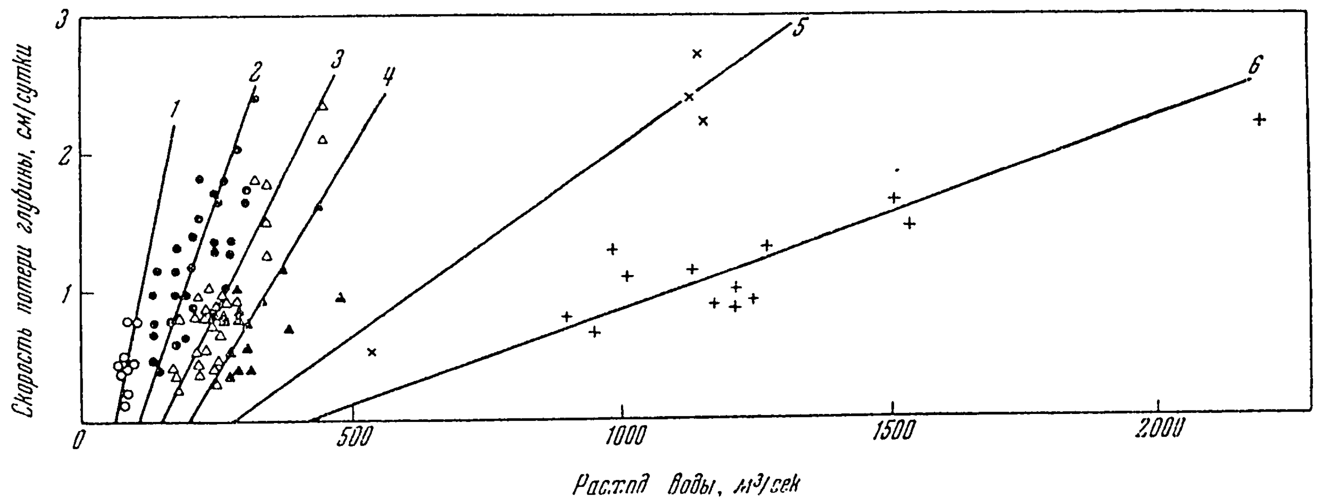
Задача о возможных деформациях искусственно создаваемых земляных русел возникает в том случае, если не удается обеспечить неразмывающие скорости. Деформации при этом имеют пространственный характер и пока не могут быть определены теоретическим путем. Так как в этом случае создается новый водоток, нет возможности использовать его предысторию. Для решения задачи могут быть использованы либо аналогии, либо эмпирические русловые зависимости, связывающие среднюю ширину и среднюю глубину русла с расходом воды, уклоном и т. п.

По С. Т. Алтунину эти зависимости имеют следующий вид:

$$\frac{B^m}{H} = k; \quad B = A\frac{Q^{0,5}}{i^{0,2}}, \qquad (15)$$

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2



Фиг. 13. Зависимость скорости обмеления судоходных прорезей от расхода воды для равнинных рек с различными средними многолетними расходами воды

№ 1 ○ — 350 м³/сек, № 2 ● — 600 м³/сек; № 3 △ — 800 м³/сек, № 4 ▲ — 1200 м³/сек, № 5 × — 1700 м³/сек. № 6 + — 3400 м³/сек

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

где B — ширина русла реки по урезу воды (*м*);
H — средняя глубина (*м*);
m — показатель степени, зависящий от формы русла и типа реки;
i — уклон водной поверхности;
Q — расчетный руслоформирующий расход (*м³/сек*);
A — параметр, характеризующий устойчивость ширины реки $(сек/м)^{1/5}$.

За расчетный расход при проектировании принимается максимальный расход с обеспеченностью 2—10%.

Значения параметров A, m и k даны в таблице.

Участки и реки	m		k		A	
	Профили					
	а	б	а	б	а	б
Горный	1	0,8	16	10	0,7	0,9
Предгорный	0,8	0,67	10	9	0,9	1,0
Средний	0,67	0,50	9,0	5,0	1,0	1,1
Нижнее течение рек:						
Типа Сыр-Дарьи (берега из суглинка)	0,57	0,50	4,1	3,0	1,1	1,3
Типа Аму-Дарьи (берега из песка)	0,54	0,50	8	10	1,3	1,7

В этой таблице профили **а** относятся к участкам с малоразмываемыми берегами и размываемым дном, профили **б** — к участкам с легкоразмываемыми берегами.

Для определения значения параметра устойчивости A при расходах, отличных от руслоформирующего, С. Т. Алтунин рекомендует выражение

$$A_x = A\sqrt{\frac{u}{u_x}}, \qquad (16)$$

где A_x и u_x — параметр устойчивости и скорость, соответствующие заданному расходу;
A и u — параметр устойчивости и скорость, соответствующие руслоформирующему расходу.

Зависимости С. И. Рыбкина, полученные в 1947 г., имеют вид:

$$\left.\begin{aligned} B &= 4{,}67\ Q^{0,57} K^{0,13} i^{-0,07}, \\ H &= 0{,}069\ Q^{0,22} K^{0,50} i^{-0,24}, \\ u &= 0{,}778\ Q^{0,21} K^{0,37} i^{-0,31}, \end{aligned}\right\} \qquad (17)$$

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

где B — средняя на участке ширина (*м*), получаемая как частное от деления площади зеркала всего участка на его длину (считая по динамической оси);

H — средняя на участке глубина (*м*), получаемая как частное от деления всего объема воды на участке на площадь зеркала;

u — средняя на участке скорость течения (*м/сек*);

Q — средний многолетний расход воды (*м*^{3}/*сек*);

i — средний уклон на участке;

K — модульный коэффициент, определяемый как отношение данного мгновенного расхода к среднему многолетнему.

Числовые коэффициенты и показатели степени в формулах С. И. Рыбкина были вычислены для условий Верхней Волги и Оки.

Применение русловых зависимостей позволяет судить о направлении процесса и получить ориентировочные представления о вероятных средних размерах русла к моменту окончания интенсивных деформаций. Однако эти зависимости не дают представления о скорости процесса. Последний вопрос можно решать пока только одним путем — привлечением аналогов.

Методы моделирования. Одним из методов прогнозирования русловых изменений является моделирование. Применение такого способа определения русловых деформаций вызывается тем, что в некоторых случаях получить достаточное представление о них расчетным методом невозможно.

Чтобы получить на модели деформации русла, подобные натурным, нужно создать на модели подобный натуре русловой процесс либо весь целиком, либо только в тех его частях, которые определяют изучаемую категорию русловых деформаций.

В зависимости от задач, стоящих перед исследователем, при прогнозировании могут представить интерес русловые деформации, определяющиеся различными частными процессами, входящими в общий комплекс руслового процесса. При исследованиях могут возникнуть следующие наиболее распространенные задачи:

1. Задачи, связанные с русловыми изменениями, являющимися результатом либо естественного хода руслового процесса, либо изменений его под действием гидротехнических сооружений. К таким задачам относятся, например, изучение плановых и глубинных изменений речного естественного русла (смещение и деформации перекатов на свободных реках, размывы берегов, углубление, искривление и перемещение русел); исследование изменения типа руслового процесса или характеристик руслового потока на участках рек

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

с мостовыми переходами; изучение углубления и других изменений русла значительно ниже плотин по течению, являющихся результатом изменения режима водного потока в связи с постройкой плотины, а также задержки наносов в водохранилище; исследование изменений русловых форм (в частности, перекатов) в зонах выклинивания подпора от плотин, а также изменений русловых форм на отрегулированных участках рек у водозаборов и других сооружений, лишь частично изменяющих естественный ход руслового процесса.

2. Задачи, связанные с русловыми изменениями общего характера в искусственных условиях, когда естественный русловой процесс не проявляется или проявляется незначительно. К таким задачам относятся, например, задачи, касающиеся изучения заиления верхнего бьефа плотин, размыва в нижнем бьефе плотин несколько ниже их по течению и др. Следует отметить, что по мере удаления от плотин вниз по течению русловые изменения происходят в условиях, приближающихся к рассматриваемым в задачах первой группы. По мере развития деформаций условия, в которых они происходят, будут меняться, вследствие чего расположение участков русла, для которых характерны задачи второй группы, могут со временем также изменяться.

3. Задачи, связанные с русловыми изменениями местного характера, являющимися следствием локального изменения гидравлической структуры водного потока непосредственно у сооружений и накладывающимися на русловые деформации общего характера. Эти задачи в дальнейшем не рассматриваются.

В соответствии с различными задачами прогнозирования русловых деформаций при помощи моделирования следует применять и различные приемы и методы моделирования. Необходимость разделения на группы задач по исследованию руслового процесса методом моделирования вызвана недостаточной разработанностью общей теории руслового процесса, на которой базируются основные положения теории моделирования.

Моделирование русловых процессов может быть выполнено наиболее строго на основе классической теории подобия. Согласно этой теории необходимым и достаточным условием для достижения подобия является тождество внутреннего механизма процесса в натуре и на модели, для чего требуются достижение тождества определяющих критериев и подобие на границах системы (подобие условий однозначности). Критерии подобия находят из полученных путем математического анализа уравнений, описывающих изучаемый процесс.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Если такие уравнения неизвестны, то строгие критерии подобия и критериальное уравнение не могут быть получены. Следовательно, не может быть осуществлено и строгое моделирование процесса. В этих случаях возможно лишь приближенное подобие, основу которого составляет тождественное с натурой воспроизведение на модели тех сторон процесса, которые обстоятельно изучены в натуре.

Очевидно, что перенос результатов модельного исследования в натуру может быть выполнен только для тех характеристик процесса, которые воспроизводились на модели заведомо подобно натуре.

К приближенному моделированию приходится прибегать и в тех случаях, когда критерии подобия известны, но число определяющих критериев таково, что одновременное выполнение их тождества для модели и натуры практически неосуществимо (хотя иногда принципиально и возможно). Не имеется пока математического описания руслового процесса, не выявлены исчерпывающе его основные закономерности. Поэтому моделирование этого процесса в полном объеме в настоящее время неосуществимо.

Применяя приближенное моделирование для прогноза русловых изменений, необходимо в зависимости от исследуемой задачи выбирать такую методику моделирования, которая обеспечивает получение на модели подобных натуре главных составных частей процесса, характерных для данной задачи. Это требует моделирования тех основных факторов, которые однозначно определяют ход изучаемого процесса.

При исследовании русловых деформаций, являющихся результатом хода руслового процесса, в естественных условиях или при некотором изменении режима реки гидротехническими сооружениями (п е р в а я з а д а ч а) может быть рекомендована методика, разработанная в ЦНИС О. В. Андреевым и И. А. Ярославцевым. Эта методика является дальнейшим развитием метода «натурального моделирования», предложенного М. А. Великановым.

Принцип «натурального моделирования» заключается в создании малой лабораторной реки, тип руслового процесса которой подобен натуральному русловому процессу. Плановые и вертикальные масштабы находятся в таком соотношении, которое соответствует моделируемому процессу. Применяя для получения лабораторной реки описанную методику, можно получить на модели качественно подобный натуре ход руслового процесса и ряд зависимостей, описывающих исследуемый частный процесс. Расчет же аналогичных величин в натуре производится по натурным данным (моделирование с расчетами).

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Методика основана на разработке комплекса практических приемов, при использовании которых на модели воспроизводятся основные черты натурного руслового процесса реки того или иного типа. При этом исходят из того, что тип руслового процесса определяется характером движения, размером и формой структурно-перемещающихся в русле наносных скоплений (гряд).

Образование того или иного вида структурно-перемещающихся скоплений наносов является результатом непрерывного взаимодействия твердой и жидкой сред. Этот процесс не может быть описан теми закономерностями транспортирования грунта водным потоком, которые имеются пока лишь для равномерного движения наносов.

Исходя из этого, критерием качественного подобия модельного руслового процесса натурному являются в этой методике тождественный натуре характер движения и относительные размеры и форма структурно-перемещающихся наносных скоплений.

Факторами, определяющими тип и интенсивность руслового процесса, являются три независимые величины: водность потока, уклон и характеристика грунтов, участвующих в русловом процессе. Для примерного подбора на модели количественных соотношений параметров этих факторов составлена специальная таблица. Данные ее представляют собой некоторые средние величины, нуждающиеся в корректировке применительно к изучаемой реке. При этом следует иметь в виду, что водность потока определяется не только величиной расхода, но и характером гидрографа. Форма и модельность гидрографа должны быть подобными натуре. Соотношение максимального и меженнего расходов также должно удовлетворять этому требованию с некоторыми отступлениями, чтобы движение модельных наносов при межени осуществлялось примерно подобно натурному. Длительность паводочного периода следует назначать, исходя из идентичного натуре изменения (смещения) русловых форм за паводок, а длительность меженнего периода— исходя из идентичности доработки паводочных русловых форм при низких водах.

Характеристики модельных грунтов практически могут быть любыми, но они должны быть согласованы с расходом потока и уклоном модели и, кроме того, должны обеспечивать тождественную натуре относительную размываемость берегов по сравнению с дном русла. Если на исследуемой реке имеются побочные факторы, осложняющие русловой процесс, то они должны быть воспроизведены и на модели. Так, например, если в натуре имеются неразмываемые части русла, то они должны быть воспроизведены на модели.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Масштаб инженерных сооружений при моделировании нужно выбирать исходя из размеров русловых форм, полученных в результате хода модельного руслового процесса, причем привязка размеров сооружений должна производиться к размерам таких русловых форм, искусственное изменение которых может вызвать смену типа руслового процесса.

При моделировании русловых изменений общего характера в искусственных условиях, когда естественный русловой процесс не проявляется или проявляется очень слабо (вторая группа задач) и основным содержанием процесса является транспорт наносов водным потоком, возможны масштабное моделирование, основанное на теории подобия, и пересчет геометрических и гидравлических характеристик модели и модельного потока на натуру. Таким образом достигается не только качественное, но и количественное подобие.

При моделировании необходимо выдержать три критерия подобия: критерий режима движения водного потока, определяемый числом Рейнольдса Re, параметр кинетичности потока, или число Фруда, Fr и критерий подвижности наносов, обозначаемый различно в зависимости от его содержания.

Для получения на модели режима движения водного потока, идентичного натуре, необходимо, чтобы явление на модели относилось к квадратичной или переходной областям при обязательном равенстве коэффициентов сопротивления модельного и натурного русел λ. В тех случаях, когда это равенство недостижимо и сопротивление русла модельного потока превышает сопротивление речного русла, в практике применяют искажение вертикального масштаба по сравнению с горизонтальным в соответствии с увеличением коэффициента сопротивления. Применяя этот прием, можно удовлетворить основным уравнениям осредненного движения речного потока и обеспечить таким образом подобие средних скоростей течения и перепадов уровня. Распределение же скоростей по вертикали, поперечная циркуляция и общая кинематическая картина модельного потока будут нарушены. На практике в тех случаях, когда можно удовлетвориться подобием указанных средних характеристик потока, изложенный прием приближенного моделирования можно признать допустимым. Если же требуется получить более полное подобие явлений, искажение может быть допущено лишь при условии, что на модели отношение глубины потока к гидравлическому радиусу не будет превышать 1 : 2 для характерного элемента потока.

Критерий подвижности наносов может быть выражен или через соотношение избытка фактической влекущей силы $(S - S_0)$ к начальной силе влечения S_0, при которой наносы приходят в движение, или через соотношение избытка факти-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

ческой скорости потока к начальной скорости трогания наносов, т. е.

$$E_S = \frac{S - S_0}{S_0} = \text{idem или } \frac{u - u_0}{u_0} = \text{idem}. \quad (18)$$

Принципиальная физическая сущность этих критериев одинакова. Следовательно, можно пользоваться любым из них в зависимости от того, какие элементы лучше изучены на том речном участке, который воспроизводится на модели.

Согласно методике, разработанной И. В. Егиазаровым, должен быть выдержан критерий подвижности наносов по избытку влекущей силы. Это может быть достигнуто различными путями. Если коэффициент сопротивления русла f_0, т. е. характер обтекания наносов на модели и в натуре, выдерживается одинаковым, то тождество критериев подвижности достигается или моделированием наносов в том же масштабе, который принят для водного потока (что возможно, если f_0 относится к области квадратичного обтекания), или применением наносов более крупных, чем по геометрическому подобию, с одновременным уменьшением их относительной плотности (во всех областях обтекания).

Если же выдержать равенство коэффициентов сопротивления невозможно, то выполнение тождества критериев подвижности для натуры и модели (которое может быть достигнуто и в этом случае путем изменения характеристик наносов, но с учетом разных значений коэффициентов сопротивления) приведет лишь к подобию расходов наносов в натуре и на модели. Это определяется тождеством критериев расхода наносов

$$E_р = \frac{q_н}{\gamma q_в\, i^{1/2}} = \text{idem}, \quad (19)$$

где $q_н$ — секундный расход наносов на единицу ширины потока в весовых единицах (за вычетом архимедовой силы);

$q_в$ — объемный секундный расход воды на единицу ширины потока;

γ — удельный вес воды;

i — уклон потока.

Критерий $E_р$, как показал И. В. Егиазаров, однозначно определяется критерием подвижности наносов E_S, т. е.

$$E_р = \varphi(E_S). \quad (20)$$

Так как критерий подвижности наносов и связанный с ним второй критерий расхода наносов составлены для условий равномерного движения наносов в плоском русле, то,

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

строго говоря, приведенная выше методика пересчета в натуру модельных характеристик справедлива именно для этих условий. Применение этой методики в других условиях приводит к известному отклонению от строгого подобия. Это отклонение тем больше, чем больше отклоняется движение водного потока и наносов от равномерного движения в плоском русле с недеформируемыми берегами.

В методике И. В. Егиазарова для характеристики обтекания наносов используется коэффициент сопротивления русла F_0, который изучен для различных областей обтекания. График зависимости f_0 от $\mathrm{Re}_{0*d} = \frac{u_{0*} d}{\nu}$, т. е. числа Рейнольдса, вычисленного по начальной динамической скорости трогания и по диаметру наносов, представлен на фиг. 14. Этот график составлен И. В. Егиазаровым по данным многочисленных экспериментов, проведенных различными авторами.

Моделирование русловых изменений применительно к задачам второй группы можно производить также пользуясь вторым критерием подвижности наносов, указанным выше, т. е. исходя из равенства масштабов скорости потока u и начальной скорости трогания наносов u_0. При этом необходимо выдерживать определенное соотношение масштабов крупности и плотности наносов с масштабом динамической начальной скорости их трогания (методика И. И. Леви). В зоне переходных режимов, когда заданный масштаб неразмывающих скоростей не может быть выдержан, приходится применять на модели легкоподвижные наносы меньшего, чем в натуре, удельного веса. Уменьшение удельного веса должно быть компенсировано соответственным увеличением крупности частиц.

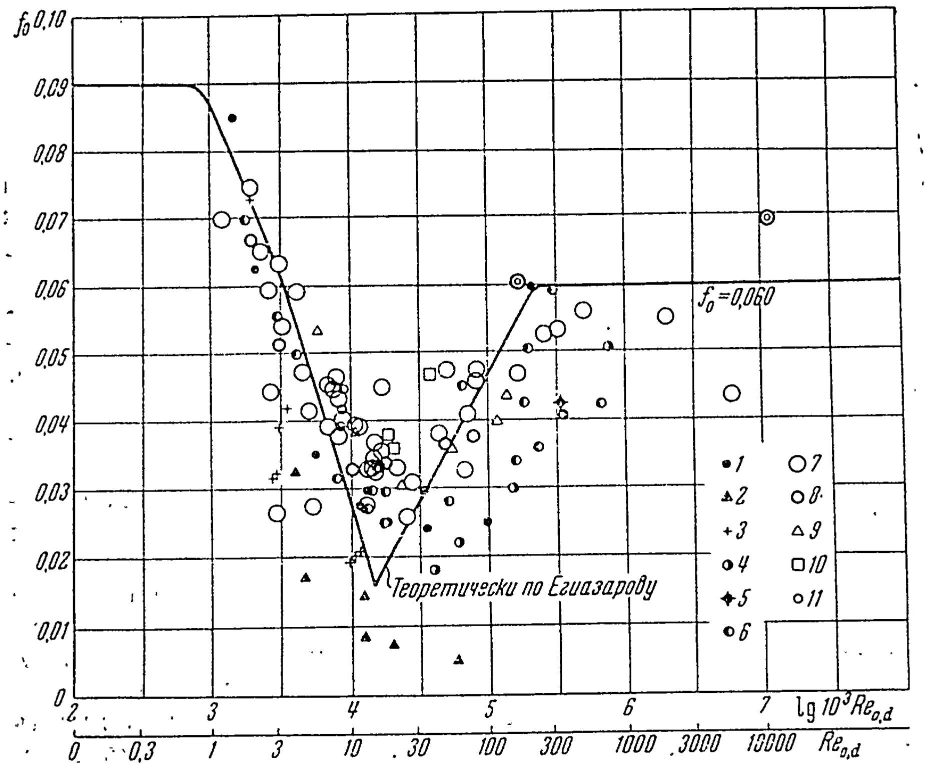
Приведенные выше критерии дают возможность получить все масштабные множители для перевода модельных характеристик осредненного движения в натуру. Кроме описанных методов моделирования, в достаточной мере обоснованных, которые могут быть применены ко второй задаче моделирования, отдельные лаборатории и авторы используют и другие практические приемы моделирования и основанные на них масштабные коэффициенты в зависимости от того, что они принимают за исходные критерии и отправные натурные данные. Н. А. Ржаницын строит систему масштабных множителей для перевода в натуру модельных характеристик, исходя не из условий сдвига, а из условий отрыва частиц от дна. В этой системе множителей не фигурирует зависящая от характера обтекания зерен величина коэффициента сопротивления русла f_0.

В другой группе предложений исходным является условие обязательного различия вертикального и горизонтального

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

масштабов модели, причем степень расхождения масштабов предлагается назначать в соответствии с выявленной в натуре связью соотношения глубины и ширины русла с различными первичными характеристиками рек. К этой группе относятся предложения М. А. Великанова, С. Т. Алтунина, И. Я. Орлова и др.



Фиг. 14. Зависимость коэффициента сопротивления русла от числа Рейнольдса, вычисленного по начальной динамической скорости трогания и по диаметру наносов:

1 — Кнороз—Леви; *2* — Фидман; *3* — Схейф—Тейсе; *4* — Шоклич; *5* — Уайт; *6* — Тисон; *7* — Крамер, Uswes, Чанг, Индри, Соколов, Казей при $\gamma_н$=2,65 (точка I при $\gamma_н$=2,05, точка II при $\gamma_н$=3,89); *8* — Шильде—Казей, Шильде—Гильберт при $\gamma_н$=2, 65; *9* — Шильде при $\gamma_н$=4,25; *10* — Шильде при $\gamma_н$=1,27; *11* — Гильде при $\gamma_н$=1,06.

Наиболее близко к изложенному выше методу И. В. Егиазарова подходит методика С. Т. Алтунина и И. Я. Орлова, основанная на эмпирически подобранной нелинейной зависимости между шириной и глубиной русла (15). Эта зависимость вводится как дополнительный критерий, причем считается, что и k и m одинаковы для натуры и модели. Показатель степени m поставлен в зависимость от избытка влекущей силы. Пред-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

полагается, что идентичность этого показателя степени для натуры и модели совместно с динамическим подобием водного потока (неполным для равнинных рек ввиду различных горизонтальных и вертикальных масштабов) обеспечивает тождество транспортирующей способности потока. Применение разных горизонтального и вертикального масштабов потока затрудняет исследование работы гидротехнических сооружений на таких моделях, так как сооружения также приходится делать в таких же разных масштабах. Поэтому рекомендуется применять двукратное моделирование: участки русел вдали от сооружений моделировать так, как указано выше, а участки русел, непосредственно примыкающие к сооружениям, и сооружения моделировать по правилам полного геометрического подобия.

При прогнозе русловых изменений (применительно к задачам второй группы) можно использовать и другие методы модельных исследований. К ним относится, например, метод изучения структуры водного потока на последовательно перестраиваемых жестких моделях. Каждая последующая модель как бы повторяет предыдущую, но деформированную соответственно структуре водного потока, по ней протекавшего. Этот метод, разработанный А. Д. Халтуриным, успешно применяется в лаборатории гидравлических исследований Гидропроекта.

При решении задач первой и второй групп нередко возникает необходимость моделирования не только влекомых, но и взвешенных наносов. В некоторых случаях, например при исследовании заиления верхних бьефов равнинных рек, правильное воспроизведение движения взвешенных наносов является главной задачей при моделировании. В качестве модельных взвешенных наносов обычно применяются материалы, удельный вес которых близок к единице, поскольку условием подобия взвешенных наносов для модельных водных потоков, смоделированных по принципам гравитационного подобия (без искажения масштабов), является равенство их гидравлической крупности в натуре и на модели. Для выполнения этого условия часто используются акрилатные порошки, причем для изменения их гидравлической крупности можно использовать предложенный М. А. Мостковым прием изменения объемного веса жидкости путем растворения в ней определенного количества соли.

Для исследования движения взвеси можно применять разработанную Н. П. Зреловым методику моделирования движения кварцевого песка на шарах-индикаторах, позволяющую иметь модельные частицы весьма малого удельного веса и одновременно большого размера.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Комбинированные методы. При лабораторных исследованиях целесообразно комбинировать метод моделирования с расчетами или переходить от моделирования конкретных объектов к подробному изучению закономерностей, которым подчиняются исследуемые явления или частные процессы. Последний метод успешно применяется в лабораториях ВНИИГ, ЦНИС, Гидропроекта, САНИИРИ, ЦНИИЭВТ и в других. Найденные закономерности переносят в натуру с обязательным установлением правомерности этого переноса; при этом модель рассматривается как частный случай натуры.

Метод моделирования с расчетами не требует непосредственной экстраполяции. При использовании этого метода необходимо лишь добиться получения на модели процесса, качественно подобного натуре, и установить вид или характер основных зависимостей, описывающих главные стороны модельного процесса. Затем производят расчет по зависимостям того же вида, но составленным исключительно по натурным данным.

Метод моделирования можно комбинировать также с расчетами по методу баланса твердого материала. Этим методом решаются задачи, отдельные части которых либо не могут быть разрешены единым методом, либо решение их различными методами даст какие-либо преимущества. Так, например, комбинированный метод прогноза может найти применение при решении задач о деформациях бьефов гидроузла со сравнительно низким напором, где осуществляется отбор воды в деривацию. В этом случае доля твердого стока, поступающего в деривацию, при сложных контурах потока может быть приблизительно оценена только путем моделирования. Воспроизводство же на модели всего процесса в целом из-за значительной протяженности бьефов может оказаться невозможным или дорогостоящим. Тогда может быть применен комбинированный метод решения задачи: общие деформации русла в верхнем и нижнем бьефах, являющиеся результатом нарушения баланса твердого стока, устанавливаются расчетом, а деление стока наносов у гидроузла между деривационным каналом и руслом реки моделируется. Таким образом, сложная задача о полном балансе твердого стока реки в пределах бьефов гидроузла сводится к ряду отдельных более простых задач, решаемых различными методами.

Глава IV

ЗАИЛЕНИЕ ВОДОХРАНИЛИЩ И ЕГО РАСЧЕТ

Подпор, создаваемый перегораживающими реку гидротехническими сооружениями, влечет за собой отложение наносов в верхнем бьефе. Сначала происходит подъем дна в пределах зоны первоначального подпора. Со временем деформации русла

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

и подпор распространяются вверх против течения реки и завершаются лишь тогда, когда на всем протяжении от плотины до истоков транзит наносов приходит в соответствие с поступлением их с водосбора. В заполнении емкости подпертого бьефа участвуют не только наносы, приносимые подпираемой рекой, но также и оседающие продукты разрушения берегов водохранилища.

Решающее значение с точки зрения заполнения водохранилищ наносами имеет режим пропуска через плотины половодий и паводков. Если высокие воды проходят при уровнях, лишь немногим превышающих естественные, то наличие плотины мало сказывается на состоянии ложа в верхнем бьефе. Напротив, при плотинах, создающих значительный подпор не только в период межени, но и во время пропуска высоких вод, обмеление верхнего бьефа неизбежно.

На горных реках, даже при устойчивом, слаборазмываемом дне, поток обычно несет большое количество твердого материала, смываемого со склонов бассейна. Поэтому деформации русла реки и ложа водохранилища происходят и в том случае, когда русло в бытовом его состоянии не деформировалось. В некоторых случаях процесс отложения наносов выше плотины может ограничиваться только заполнением водохранилища без значительного распространения деформаций вверх по реке. Это может наблюдаться, если горный поток, имеющий слабодеформируемое дно, недогружен наносами и вследствие этого приносимый с верховьев материал транспортируется по заполненному отложениями водохранилищу уже при пониженном уклоне дна.

Водохранилища на горных реках, обладающих большими уклонами и несущих значительное количество твердого материала, заносятся сравнительно быстро, иногда за одно половодье. Распределение отложений по длине водохранилища зависит от крупности наносов. Если река имеет мелкие наносы, то отложения их достигают наибольшей мощности в нижней части водохранилища. Наоборот, крупные фракции наносов, перемещающиеся главным образом в придонной области потока, отлагаются в верховьях водохранилища, нередко образуя гряду (бар), гребень которой постепенно перемещается вниз по течению.

Равнинные реки характеризуются, как правило, наличием поймы, относительно малыми уклонами и сравнительно небольшим содержанием наносов. Все это способствует созданию водохранилищ большой емкости с длительными сроками занесения.

В водохранилищах равнинного типа наносы постепенно отлагаются по всей длине водохранилища, причем распреде-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

ление отложений зависит от подводного рельефа его различных участков. Распределение отложений вдоль всего подпертого бьефа объясняется незначительной крупностью наносов, плавностью и постепенностью изменения гидравлических условий по длине потока, а также тем, что из-за малости уклонов область выклинивания подпора при колебаниях расхода воды и при сработке и наполнении водохранилища перемещается вдоль по реке на значительном протяжении. Оценка общего срока заиления водохранилища может производиться по балансу твердого материала по водохранилищу в целом.

Грубо оценить срок заиления можно по отношению мертвого объема водохранилища к годовому твердому стоку. Для крупных водохранилищ на равнинных реках такая оценка часто оказывается достаточной, так как она может показать, что срок заиления водохранилища выходит далеко за пределы, имеющие практическое значение.

При сравнительно малых сроках заиления водохранилища в целях уточнения нужно вводить в расчет используемую для отложений емкость, образующуюся вследствие продвижения подпора в ходе заиления вверх по течению. Длину призмы отложений в первом приближении можно определять по эмпирической формуле С. Т. Алтунина

$$L = k\frac{\Delta H_0}{i}, \tag{21}$$

где L — длина призмы заиления;
k — опытный коэффициент;
ΔH_0 — разница между отметками подпорного и бытового уровней воды при пропуске руслоформирующего расхода;
i — бытовой уклон водной поверхности.

Величина i дается С. Т. Алтуниным в зависимости от стадий процесса отложения наносов. К моменту окончания первого периода, когда в водохранилище прекращается отложение взвешенных наносов, k=1,2. К концу второго периода, когда через водохранилище транспортируется большая часть донных наносов, k=5,5. При полном занесении водохранилища k=10. Для установления рабочего срока водохранилища следует из осторожности принимать k=1,2.

Учет влияния динамики процесса на срок заиления водохранилища можно произвести и другими приемами, в частности методом Г. И. Шамова, основанным на эмпирической обработке материалов исследований по существующим водохранилищам. По Г. И. Шамову, уменьшение объема той части водохранилища

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

W_t, в которой могут отлагаться поступающие сверху наносы, выражается равенством

$$W_t = W_0 a^t. \tag{22}$$

Это уравнение предложил Орт и преобразовал Г. И. Шамов применительно к расчету заиления водохранилища.

Здесь W_0 — предельный объем отложившихся в водохранилище наносов, соответствующий установившемуся режиму движения наносов в пределах водохранилища, при котором дальнейшее отложение наносов прекращается; t — время, отсчитываемое от начала заиления (в годах).

Параметр a определяется из соотношения

$$a = 1 - \frac{G}{W_0}. \tag{23}$$

Для приближенных подсчетов G и W_0 можно воспользоваться следующими зависимостями:

$$G_0 = G\left[1 - \left(\frac{\omega_р}{\omega_п}\right)^n\right], \tag{24}$$

$$W_0 = W\left[1 - \left(\frac{\omega_р}{\omega_п}\right)^m\right], \tag{25}$$

где G — расчетный годовой сток наносов;
G_0 — объем отложений в первый год;
W — полный первоначальный объем водохранилища;
$\omega_р$ — поперечное сечение реки в бытовых условиях при расходе воды, равном $^3/_4$ от максимального расчетного расхода воды;
$\omega_п$ — поперечное сечение бьефа на ближайшем к плотине расширенном участке;
n — показатель степени, меняющийся от 1 до $^1/_3$ в зависимости от продольного уклона реки или от протяженности водохранилища;
m — показатель степени, равный 1,7.

Наиболее надежные результаты дает применение метода баланса твердого материала с расчетом хода заиления по длине водохранилища и по времени. Расчет заиления с учетом распределения отложений по длине подпертого бьефа не только дает оценку срока заиления водохранилища, но и воспроизводит весь ход процессов, что нередко входит в состав задачи расчета.

В большинстве случаев водохранилища имеют сложные очертания. Поэтому расчет отложения наносов в них методом баланса твердого материала ведется по конечным приращениям.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

При определении расхода взвешенных наносов предполагается, что в каждом расчетном створе мутность потока отвечает стационарному ее режиму, т. е. расчет проводится по «предельной» мутности потока. Такой прием рекомендуют М. А. Великанов, И. И. Леви, С. Т. Алтунин, К. И. Россинский, И. А. Кузьмин и др.[1] Расчетные зависимости, применяемые в этом случае, приведены в главе III.

Весь расчет следует вести с подразделением наносов хотя бы на две-три фракции по крупности. Для построения кривых подпора, необходимых в ходе расчетов, могут быть использованы применяющиеся в современной речной гидравлике методы с тем ограничением, что в процессе расчета надо учитывать изменения пропускной способности русла, вызываемые его деформацией. Поэтому нельзя применять способы построения кривых подпора, основанные на непосредственном использовании гидрометрических данных, характеризующих пропускную способность русла в естественном его состоянии.

Глава V

ФОРМИРОВАНИЕ БЕРЕГОВ ВОДОХРАНИЛИЩ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЕТРОВЫХ ВОЛН

Формирование берегов водохранилищ, а также дна прибрежной зоны и мелководий происходит совершенно различно в зависимости от расстояния до плотины. Для правильной организации хозяйства по берегам водохранилищ, а также для оценки условий заполнения полезной емкости бьефов продук-

---

[1] В работах М. А. Мосткова и И. И. Мечитова анализ заиления водохранилищ проводится по предельно транспортируемой крупности наносов, которая для взвешенных наносов устанавливается по динамической скорости u_*, а для донных наносов по начальной скорости влечения u_0. Такой подход к решению задачи не отражает физической сущности рассматриваемых явлений и приводит к неправильным выводам. Согласно допущениям М. А. Мосткова и И. И. Мечитова, поступающие в водохранилище твердые частицы определенной крупности полностью выпадают из потока в том створе, где вследствие подпора скорость течения снижается до указанных критических значений; таким образом, по длине подпертого бьефа как бы происходит точная сортировка отложений по крупности. В действительности же наносы каждой фракции не выпадают целиком в каком-то определенном створе, а распределяются по длине водохранилища в соответствии с постепенным падением транспортирующей способности потока. Несоответствие построения М. А. Мосткова и И. И. Мечитова действительности становится особенно очевидным при однородном составе поступающих в водохранилище наносов. В этих случаях получаются выводы, явно противоречащие фактическому ходу процесса отложения наносов, а именно: необходимость выпадения всех наносов в одном створе.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

тами размыва при проектировании необходимо определить размеры разрушений береговой полосы, происходящих по наполнении водохранилища, а также под действием ветровых волн, которые являются важным фактором изменения рельефа берегов и дна водохранилищ. При определении деформаций берегов водохранилищ необходимо учитывать: форму берега и дна в момент затопления, геологическое строение водохранилища, режим движения наносов и характер регулирования стока.

В настоящее время для практических целей используются геологические методы расчета будущей формы берега, предложенные Г. С. Золотаревым и Е. И. Качуриным. Однако эти методы должны быть дополнены и развиты с учетом гидрометеорологического и гидрологического режима водоема. В этой области большой вклад сделан Государственным гидрологическим институтом (А. П. Браславский, Н. Е. Кондратьев и др.).

В связи с возникновением проблемы формирования берегов вновь созданных водохранилищ различные организации в последние годы предприняли соответствующие исследования и произвели наблюдения в натуре. На Рыбинском водохранилище наблюдения ведут Рыбинская обсерватория Главного управления гидрометслужбы и Институт географии АН СССР. На этом водохранилище большая часть береговой линии хорошо защищена от действия волн лесами и кустарниками, не вырубленными перед затоплением. Кроме того, значительная часть берегов сложена мореной, содержащей большое количество валунов и булыжников, образующих мощную отмостку. Лишь на отдельных участках наблюдаются перемещения береговой линии от нескольких десятков до ста метров.

Значительно менее благоприятны условия размыва берегов на Цимлянском водохранилище, где наблюдения ведут Гипроречтранс под руководством С. Л. Вендрова и Цимлянская обсерватория ГМС под руководством П. Н. Кокоулина. Легкие лёссовидные суглинки, слагающие большую часть берегов Цимлянского водохранилища, легко размываются волной. Значительная глубина и большой разгон волн также способствуют быстрому разрушению берегов. Форма берега различна в зависимости от геологического строения.

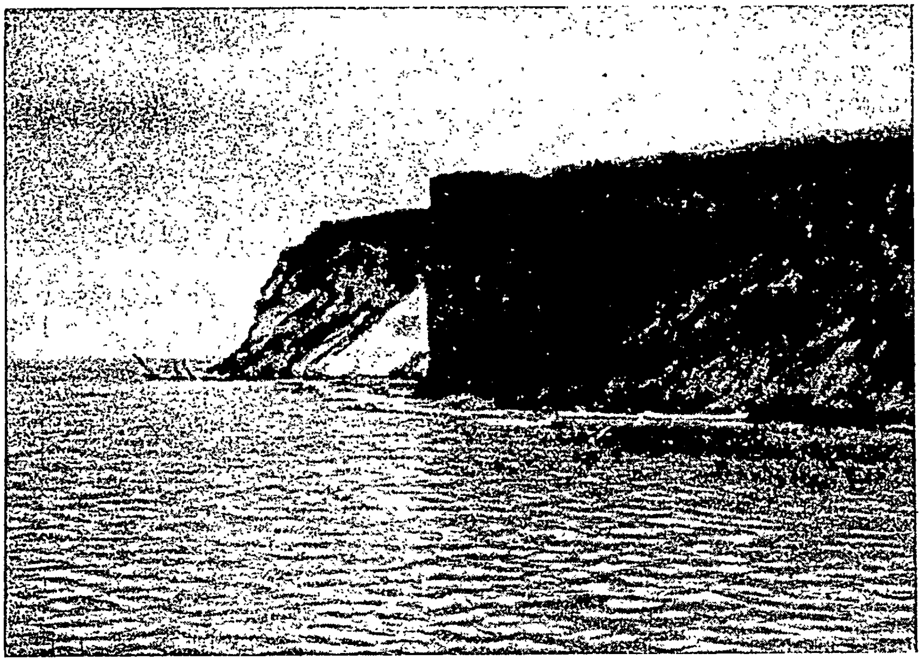
На фиг. 15 справа виден берег, сложенный лёссовидными суглинками, а слева, в нижней части разреза — песками [1]. Характерно, что хотя вертикальные берега, сложенные лёссовыми грунтами, ежегодно отступают на значительную величину, они все же сохраняют свою форму.

[1] Фотографии 15, 16, 17 выполнены в Гипроречтрансе.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

В течение первого же года наполнения водохранилища береговая линия сместилась вглубь материка на 30—40 *м*. Это смещение сопровождалось образованием высоких неустойчивых обрывов и мощными оползнями. Изменение уровня водохранилища приводит к образованию террас. На фиг. 16 видны обнажившиеся в 1954 г. нижняя аккумулятивная терраса, образовавшаяся в 1952 г., и верхняя абразионная терраса,



Фиг. 15. Берег Цимлянского водохранилища

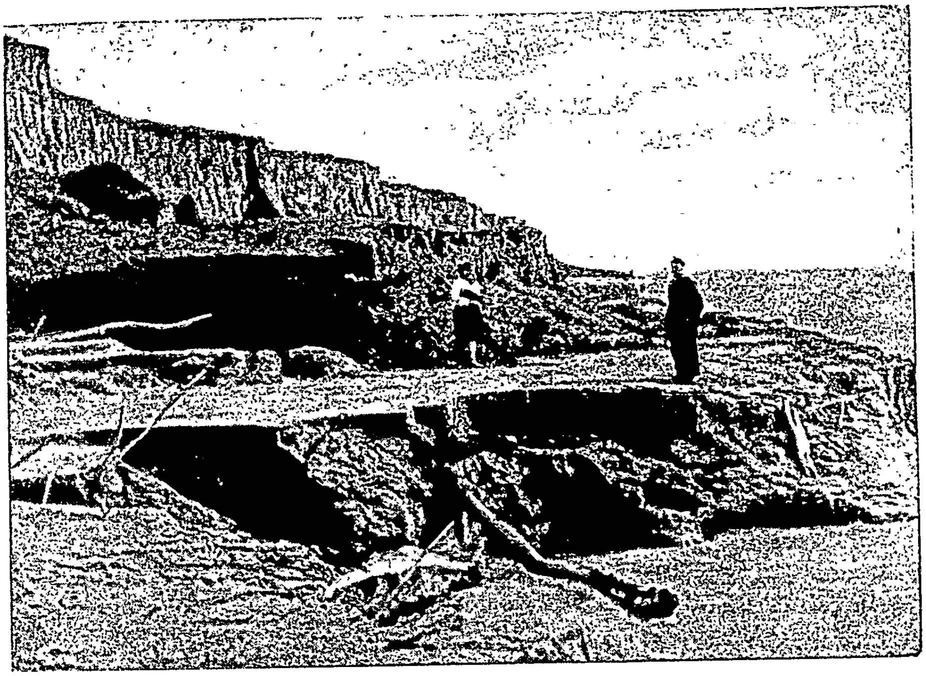
образовавшаяся в 1954 г. Одновременно с наступлением водоема в сторону материка происходит занесение судоходных трасс и особенно вновь образованных заливов продуктами разрушения берегов, в результате чего извилистость береговой линии быстро уменьшается.

По действием волнения вдоль берегов водохранилищ озерного типа формируется широкая и пологая береговая отмель. На фиг. 17 видна коса, которая в продолжение одной навигации находилась под водой и оказалась покрытой слоем наносов толщиной 140 *см*. Объем наносных отложений очень велик. В озеровидной зоне чаши водохранилища, по данным Гипроречтранса, в среднем за три года он близок к 60 тыс. $м^3$ на 1 *км* при объеме обрушившегося грунта около 100 тыс. $м^3$ на 1 *км*. Небольшие бухты и заливы в устьях балок заполняются на-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

носами в течение нескольких месяцев. Уклон береговой отмели увеличивается к береговой линии и уменьшается в сторону водоема. Этот уклон тем больше, чем крупнее размер частиц, формирующих отмель. Как правило, крупность частиц убывает в направлении от береговой линии в сторону водоема. Внешний край береговой отмели обычно характеризуется резким увеличением крутизны склона.



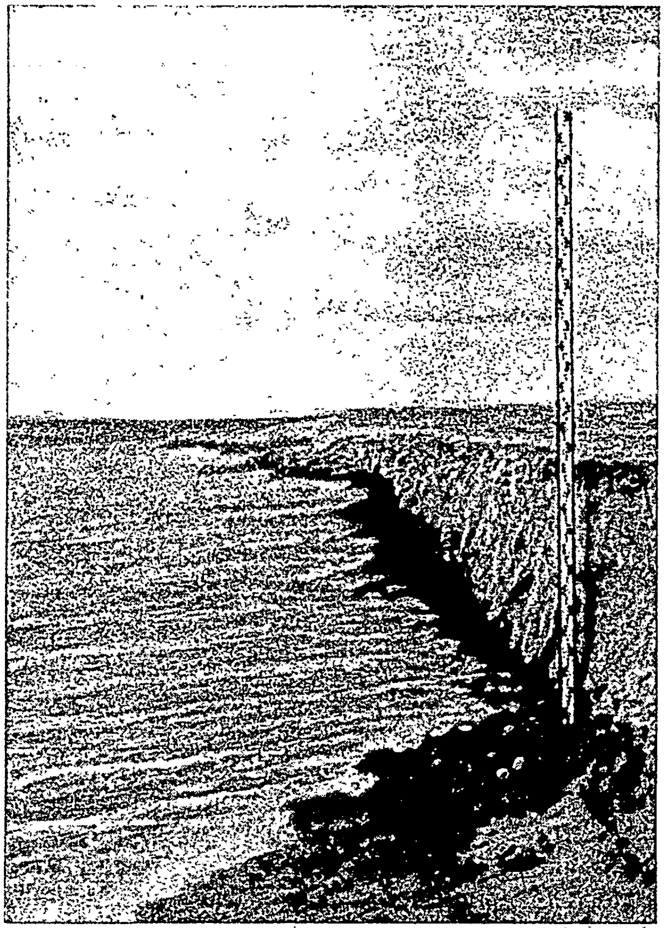
Фиг. 16. Террасы на берегу Цимлянского водохранилища

Сформировавшаяся береговая отмель защищает берег от разрушающего действия волн. Развитие отмели продолжается до тех пор, пока берег не приобретет устойчивость. Анализ механизма перемещения частиц грунта при волнении показывает, что на обращенной в сторону водоема части береговой отмели равновесие профиля достигается тогда, когда дно водоема размыто на такую глубину, при которой донные скорости становятся недостаточными для выведения частиц из состояния покоя. В той части береговой отмели, которая прилегает к берегу, равновесие профиля определяется соотношением между количеством частиц грунта, непрерывно вкатывающихся вверх по откосу, и количеством частиц, скатывающихся обратно. Граница между этими двумя зонами называется нейтральной линией.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Расчет переформирования берегов на больших водохранилищах заключается в определении формы, размеров и расположения береговой отмели. Эта задача методически разделяется на три частных вопроса:



Фиг. 17. Коса на берегу Цимлянского водохранилища

1) расчет профиля береговой отмели, устойчивого при заданном расчетном волнении и при заданном материале, из которого формируется отмель;

2) размещение построенного профиля относительно первоначального берега;

3) определение времени окончательного формирования отмели и промежуточных этапов ее развития.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Расчет устойчивого профиля береговой отмели сводится к определению глубины, на которую распространяется действие волны, и к установлению очертания отмели.

Для глубины размыва H Н. Е. Кондратьев теоретически получил следующую зависимость, которая должна быть проверена на основе натурных наблюдений:

$$H = \frac{h}{4\pi n} \operatorname{arc\,sh}\left(\frac{\pi h n}{2\Delta a}\right), \tag{26}$$

где h — высота волны;

n — ее крутизна, которая для волн озерного типа равна $^1/_8$;

Δ — опытный коэффициент, определяющий статическую устойчивость частиц, образующих дно, и зависящий от их диаметра;

$$a = \frac{\gamma'_{п} - \gamma}{\gamma},$$

где $\gamma'_{п}$ — объемный вес породы, образующей отмель;

γ — удельный вес воды.

Если для Δ и a принять значения, соответствующие обычным условиям, то формуле (26) можно придать следующее упрощенное выражение:

$$H = 0{,}64 h \operatorname{arc\,sh}(8{,}1\ h), \tag{27}$$

где H и h должны быть выражены в метрах.

Некоторые частные решения этого уравнения приводятся ниже:

h, *м*: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0.
H, *м*: 0,68; 1,72; 3,00; 4,35; 5,80; 7,30; 8,85; 10,40.

Приведенные формулы позволяют определить глубину на внешнем крае береговой отмели, если известна высота волны. Отсутствие надежных количественных зависимостей, которые позволили бы учитывать потери энергии и изменения параметров волны при распространении ее по береговой отмели, затрудняет получение теоретически обоснованного профиля последней. Поэтому для построения профиля береговой отмели приходится пользоваться эмпирическим уравнением

$$x = \frac{m_1 - m_0}{20 m_1 m_0} y^2 + \frac{1}{m_1} y, \tag{28}$$

где x — горизонтальное расстояние, отсчитываемое от уреза воды;

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

y — глубина, отвечающая расстоянию x;

m_1 — уклон пляжа, т. е. уклон линии профиля в точке уреза;

m_0 — уклон отмели на глубине 10 *м.*

Параметры m_1 и m_0 зависят от крупности частиц, слагающих отмели. Для их определения Н. Е. Кондратьев составил специальные таблицы.

На фиг. 18, *а* показана кривая, построенная по формуле (28). В качестве профиля береговой отмели эта кривая используется на участке *ab*, т. е. в пределах значений $y < H$. Точка *b* соответствует внешнему краю береговой отмели. Из уравнения (28) может быть получено выражение для ширины береговой отмели B. Эта ширина равна

$$B = \frac{H^2}{k} + \frac{H}{m_1}, \tag{29}$$

где

$$k = \frac{20 m_1 m_0}{m_1 - m_0}.$$

Приведенный выше профиль построен в предположении неизменности положения уровня воды в водохранилище. В действительности уровень воды большинства водохранилищ колеблется в некоторых пределах. В этом случае возможно только ориентировочное решение задачи. Расчет следует вести, исходя из наивысшего положения уровня воды в водохранилище.

На фиг. 18, *б* показан рассчитанный профиль (кривая *abc*) при глубине размывающего действия волны H и при величине сработки водохранилища P. В верхней части, между точками *a* и *b*, кривая строится по уравнению (28). Участок *bc* представляет прямую, которая является касательной к кривой в точке *b*.

Вся ширина береговой отмели B делится на две части: $B_п$ — часть ширины, определяемая величиной волнового воздействия, и $B_р$ — часть ширины, определяемая величиной сработки водохранилища P. Таким образом

$$B = B_п + B_р. \tag{30}$$

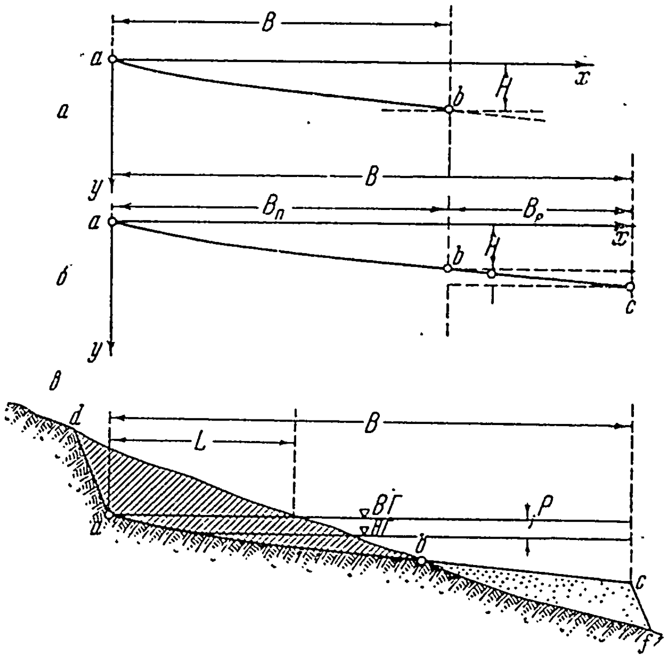
Первое слагаемое определяется по формуле (29). Второе слагаемое равно

$$B_р = \frac{P(2Hm_1 + k)}{km_1}. \tag{31}$$

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Размещение расчетного профиля относительно первоначального профиля берега определяется графическим наложением первого профиля на второй, как это показано на фиг. 18, *в*. Профиль береговой отмели выше точки *a* переходит в профиль нового надводного берега, уклон которого устанавливается как уклон естественного откоса пород, слагающих берег. Ниже точки *c* профиль отмели переходит к внешнему склону, уклон которого также определяется углом естественного откоса мате-



Фиг. 18. Схемы к расчетам переработки берегов водохранилищ

риала, слагающего отмель, с учетом того, что этот откос формируется под водой. При наложении профилей наивысшее положение горизонта воды в водохранилище (В. Г.) совмещается с осью x, а площадь абразионной призмы *dab* приводится в такое соотношение с площадью аккумулятивной призмы *bcf*, которое равно отношению объемов всех фракций, слагающих абразионную призму, к объему тех фракций этой призмы, которые по своей крупности достаточны для того, чтобы удержаться в пределах береговой отмели. Наложением поперечных профилей решается вопрос о перемещении береговой линии вглубь материка в результате размыва берега. Величина этого перемещения на фиг. 18 обозначена L.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Расчет времени переформирования берегов водохранилища строится на основе следующих положений:

а) объем размытого грунта W пропорционален волновой энергии $Э$, затрачиваемой на разрушение берега,

$$W = \alpha \cdot Э, \tag{32}$$

где α — показатель устойчивости породы против размыва волной;

б) часть волновой энергии, теряющаяся на мелководье и не затрачиваемая на разрушение берега, пропорциональна длине береговой отмели.

Построенная на этих положениях расчетная формула для малых смещений береговой линии под действием волны постоянной высоты при постоянном же наполнении водохранилища имеет вид:

$$b_2 = B - (B - b_1)\exp\left(-\frac{N_0 t}{\alpha b W'}\right). \tag{33}$$

В этом равенстве b_2 означает ширину, которой достигнет через интервал времени t береговая отмель, имевшая первоначальную ширину b_1; B — предельная ширина береговой отмели, определяемая соотношением (29); N_0 — количество энергии, приносимой волной в единицу времени на единицу ширины берега.

$$N_0 = 4050\, h^{2,5} \cos\beta \ \frac{m}{час}, \tag{34}$$

где β — угол, образованный направлением разгона волны с нормалью к береговой линии.

Входящая в равенство (33) величина W' равна приращению объема размытого грунта при удлинении отмели на величину $(b_2 - b_1)$; величина W' может быть найдена, если допустить, что в любой промежуточной стадии формирования отмели профиль ее выражается уравнением

$$x = \frac{b}{B}\left(\frac{y^2}{k} + \frac{y}{m_1}\right), \tag{35}$$

отличающимся от уравнения (28) коэффициентом $\frac{b}{B}$, что приводит к пропорциональному сокращению длины всех участков отмели.

В реальных условиях берега размываются волнами различной высоты и при различном положении уровня воды. Для расчета времени переформирования берегов следует составить проектный график изменения ветра и уровней воды на основании имеющихся натурных наблюдений и проекта водохозяйственного использования водохранилища и вести расчеты по

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

участкам этого графика, пользуясь изложенным выше приемом. При составлении расчетного графика режимов следует по возможности схематизировать его, чтобы избежать излишней расчетной работы, не соответствующей точности исходных положений.

При проведении расчетов необходимо иметь в виду, что существующие теоретические методы требуют больших уточнений. Организации, принимающие ответственные проектные решения, вынуждены нередко пользоваться методом аналогий, опираясь на малое число фактов. Поэтому необходимо продолжать и развивать натурные наблюдения на берегах водохранилищ по мере их вступления в строй действующих.

Глава VI

РАЗМЫВ РУСЛА РЕКИ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ, ВЫЗВАННЫЙ ЗАДЕРЖАНИЕМ ТВЕРДОГО СТОКА ВОДОХРАНИЛИЩЕМ

Режим русла реки в нижнем бьефе напорных сооружений неразрывно связан с процессами, происходящими в верхнем бьефе. Недостаток насыщения реки наносами, являющийся следствием отложения их в водохранилище, восполняется размывом русла.

В начале процесса насыщение потока наносами в нижнем бьефе происходит преимущественно из-за размыва дна и в значительно меньшей степени — из-за размыва берегов, особенно в тех случаях, когда размываемость берегов относительно мала. В этот период мутность потока восстанавливается на небольшом расстоянии от сооружений, а интенсивное углубление русла происходит на коротком участке реки. Затем, по мере того как глубина в зоне начального размыва увеличивается, размыв русла распространяется вниз по течению.

Распространяясь вниз по течению, процесс понижения дна постепенно замедляется. Снижение интенсивности глубинных деформаций может привести к некоторому увеличению в общем балансе наносов той доли наносов, которая поступает от размыва берегов, не полностью компенсирующегося отложениями.

Размывы русла в нижнем бьефе характеризуют лишь первую стадию общих деформаций русла, которые вызываются устройством подпорных сооружений. Эта стадия заканчивается заполнением верхнего бьефа отложениями и восстановлением прежнего расхода наносов. В больших водохранилищах начальная стадия процесса может продолжаться в течение длительных периодов, исчисляемых тысячелетиями. В таких случаях

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

практический интерес представляет только эта стадия, вернее, ее начальный этап.

При подпертых бьефах малой емкости приходится считаться с тем, что при заполнении наносами верхнего бьефа приток твердого материала в нижний бьеф увеличивается и размыв дна сменяется отложением наносов. Сначала наносы начинают отлагаться непосредственно у сооружений, а затем продвигаются и на более отдаленные участки. В заключительном периоде, наступающем после того как верхний бьеф целиком заполнится наносами, река, уклон которой в результате повышения русла увеличивается, ниже плотины восстанавливает свою бытовую способность переносить наносы, временно нарушенную недостатком поступления их из верхнего бьефа. Таким образом, после сооружения на реке плотины на нижележащем участке проходит вниз по течению волна деформаций, после затухания которой, при условии сохранения положения базиса эрозии и постоянства твердого стока реки, русло теоретически должно возвратиться в свое первоначальное состояние.

Несколько иначе протекает процесс в тех случаях, когда, кроме подпора, осуществляется также искусственный отвод воды из верхнего бьефа в районе сооружений, например захват части стока оросительным каналом, головное сооружение которого входит в состав гидроузла. В таких условиях на первой стадии процесса размывы в нижнем бьефе происходят так же, как и при отсутствии отъема воды. На практике стремятся питать каналы относительно чистой водой, поэтому после заиления водохранилища нарастание дна идет более интенсивно, так как бытовой сток наносов начинает поступать в нижний бьеф при уменьшенном, из-за забора в канал, стоке воды. В таких условиях процесс повышения дна может остановиться лишь тогда, когда уклон воды превысит естественный. Поэтому из-за избытка наносов, сбрасываемых в нижний бьеф, в нем происходит скопление их и загромождение отложениями русла реки в непосредственной близости от сооружений.

Подобным же образом протекает процесс и при отводе воды в деривацию, с той лишь разницей, что размывы идут одновременно и у головных сооружений, и у конца деривации, где в реку возвращается осветленная вода.

Явления, вызываемые недостатком питания реки наносами, осложняются местными деформациями, происходящими в результате увеличения и перераспределения скоростей течения непосредственно близ места сброса воды в нижний бьеф.

Расчет общих деформаций в нижнем бьефе производится главным образом для оценки возможных изменений в положении уровней воды. Такие расчеты ведутся описанным выше методом баланса твердого материала. При этом в качестве исход-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

ного служит гидрограф, полученный в результате водохозяйственных расчетов. Длина расчетных участков русла принимается примерно равной ширине реки или удвоенной ее величине. Расчет ведут с учетом только части твердого расхода, которая состоит из наносов, захватываемых рекой при размыве русла, т. е. из наносов руслоформирующих фракций.

При расчетах размывов в нижнем бьефе необходимо учитывать возможное ограничение размывов вследствие того, что под легкоподвижным грунтом залегают трудноразмываемые породы. Если на каком-либо расчетном участке деформация русла доходит до неразмываемых пород, то расход наносов на этом участке считается постоянным и равным расходу наносов на начальном створе для этого участка.

Если поток сильно сжат сооружениями и при выходе в нижний бьеф растекается, то необходимо учесть изменение уровенного режима непосредственно за сооружениями. Растекание потока дает снижение уровня воды против бытового положения. Расчет растекания необходим и для установления границ транзитного потока, так как дно будет деформироваться в основном только в его границах. В прилегающих же водоворотных зонах, образующихся при растекании внетранзитного потока, деформации будут относительно малы. Расчет растекания можно вести по методу Н. М. Бернадского или по методу, разработанному в последнее время в ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева.

В тех случаях, когда наносы полностью задерживаются водохранилищем и в нижний бьеф не поступают, предельное положение размытого дна устанавливается по величине неразмывающей скорости с учетом понижения уровня воды в результате углубления русла. При расчете размыва дна на реках с значительным уклоном понижение уровня воды определяется для каждой ступени времени после того, как установлены деформации русла.

При малых бытовых уклонах профиль водной поверхности можно пересчитывать после определения деформаций за несколько лет. Для построения кривых свободной поверхности при измененном рельефе дна можно применять различные гидравлические приемы расчета.

Глубину размыва дна и понижения уровня в нижнем бьефе крупных водохранилищ за весь заданный промежуток времени можно ориентировочно определить при помощи приближенного приема, предложенного И. И. Леви. Этот прием применим только при полном осаждении в водохранилище наносов руслоформирующей фракции, при условии, что форма русла в нижнем бьефе по длине реки меняется мало, а само русло на достаточную глубину сложено из легкоподвижного материала. В этом

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

случае длина участка L, на которую распространится размыв за время t, определяется из следующего равенства:

$$L = \sqrt{\frac{2Wt}{(i_б - i_0)\,B_{ср}}}.$$

В этом равенстве W означает сток наносов руслоформирующей фракции за расчетный период;

$i_б$ — бытовой уклон реки;

$i_0 = \frac{u_0^3}{C_A^2 q}$ — уклон реки, при котором скорости течения равны неразмывающим значениям u_0;

q — удельный расход воды;

$B_{ср}$ — средняя ширина реки на участке.

По найденным величинам L и i_0 устанавливаются глубина размыва и понижение уровня воды.

Глава VII

ДЕФОРМАЦИИ РУСЕЛ РЕК НИЖЕ ГИДРОУЗЛОВ ЗА ПРЕДЕЛАМИ ЗОНЫ НАСЫЩЕНИЯ НАНОСАМИ

Изменения в режиме русла реки ниже гидроузлов за пределами зоны насыщения наносами речного потока, осветленного водохранилищем, могут возникать только в связи с нарушением режима жидкого стока. Вероятность таких изменений тем больше, чем полнее зарегулирован сток. В предыдущей главе указывалось, что нижняя граница зоны насыщения наносами со временем смещается вниз по течению. Соответственно этому сокращается длина той части реки, которая находится за пределами зоны насыщения. На таких участках под влиянием измененного жидкого стока могут наблюдаться изменения продольного профиля реки и характера периодических поперечных деформаций.

Изменения продольного профиля происходят в связи с изменением по длине реки количества наносов, переносимых рекой. Если до постройки гидроузла продольный профиль реки практически был стабильным, то на бесприточных участках регулирование стока не влечет за собой нарушения стабильности профиля. Пройдя зону насыщения, река несет такое количество твердых частиц, которое отвечает ее новому режиму. Водный же режим тех рек, где нет притоков, после регулирования изменяется по длине реки в равной степени, вследствие чего сохраняется баланс наносов, если он наблюдался в бытовых условиях.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Нарушение баланса наносов следует ожидать только в местах впадения крупных притоков. При значительной степени зарегулированности стока половодное повышение воды в реке может отсутствовать. Крупные притоки, оставаясь в свободном состоянии во время прохождения по ним высокой воды, подпирают основную артерию и этим способствуют отложению наносов на участках подпора. Влияние этого подпора компенсируется в некоторой мере спадом, образующимся в межень, ввиду неодинакового приращения уровня выше и ниже притока. Влияние подпора, возникающего в половодье, может оказаться значительно бо́льшим, чем влияние спада. На таких участках может наблюдаться повышение дна на более или менее значительном протяжении. Если же решающим окажется влияние спада, то выше притока может наблюдаться некоторое понижение дна.

Продольный профиль рек, бытовой режим которых отличался неуравновешенностью твердого стока по длине реки и сопутствующим этой неуравновешенности повышением или понижением русла, также может изменяться. На таких реках под влиянием регулирования стока изменяется только интенсивность этого процесса.

Тип руслового процесса может измениться при высокой степени регулирования стока в результате уменьшения подвижности перемещающихся в русле гряд-побочней и осередков. Укажем для примера, что при уменьшении подвижности гряд-побочней у русла, имевшего в бытовых условиях режим периодического расширения, может начаться процесс меандрирования. Изменение типа руслового процесса может наступить также вследствие переработки поймы рекой при перемещениях русла поперек долины. В измененных гидрологических условиях может измениться высота и даже строение поймы, что отражается на относительной подвижности дна и берегов.

Иногда возникает вопрос о том, сохранится ли при зарегулированном стоке перекатный рельеф русла. На основании материалов, изложенных в главе I, нужно считать, что сглаживание колебаний речного стока не приводит к исчезновению перекатов, так как они являются закономерным морфологическим элементом речного русла независимо от характера гидрологического режима реки. Типы же перекатов могут измениться только в том случае, если изменится тип руслового процесса.

Изменение продольного профиля реки, связанное с неуравновешенностью твердого стока, протекает медленно. Поэтому прогноз общего повышения или понижения русла реки дается в большинстве случаев на длительный период.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

При подробном анализе явления расчет производится методом баланса твердого материала. Так как расчетом должны определяться изменения русла за длительные сроки, вычисления можно вести по среднегодовым значениям расходов воды, среднегодовому стоку наносов. Расчетные участки выделяются только между характерными переломами общего уклона реки.

Для приближенных оценок изменение интенсивности повышения или понижения дна по сравнению с бытовой скоростью процесса можно принимать равным изменению среднемноголетнего твердого стока

$$\frac{D}{D_б} = \frac{\Omega}{\Omega_б}, \qquad (37)$$

где D — скорость деформации русла в условиях зарегулированного режима реки;

$D_б$ — скорость деформации русла в бытовых условиях;

Ω — среднемноголетний сток наносов при зарегулированном режиме реки;

$\Omega_б$ — среднемноголетний сток наносов в бытовых условиях.

В настоящее время единственным методом прогноза возможности перехода режима русла из одного типа в другой может служить только метод натурального моделирования в лабораторных условиях. Однако практическое проведение таких лабораторных исследований встречает значительные трудности, так как для проведения их требуется детальное знание обстановки, в которой должен протекать прогнозируемый русловой процесс. Расчетные методы прогноза для этого случая полностью отсутствуют. Разработка таких методов, наряду с разработкой технических приемов моделирования, должна явиться предметом дальнейших исследований.

В практике гидротехнического проектирования пока приходится условно принимать, что характер периодических поперечных деформаций русла за зоной насыщения наносами сохраняется неизменным. Это допущение вполне справедливо для относительно кратковременных прогнозов, не выходящих за пределы нескольких десятилетий. Проведенное Лабораторией русловых процессов АН СССР рассмотрение деформаций русла Волги на участке от г. Щербакова до устья р. Камы за время эксплуатации Щербаковского гидроузла показало, что русловой процесс остался таким же, каким он был в бытовых условиях, несмотря на то, что Щербаковское водохранилище регулирует сток Волги уже 13 лет.

При неизменности типа руслового процесса остается учесть только изменение его интенсивности (обычно замедление). Оценку изменения интенсивности можно произвести, опираясь

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

на данные об изменении твердого стока реки по приведенному выше соотношению. Если принимать для инженерных прогнозов, что тип процесса сохраняется один и тот же, то нужно считать, что сохранятся и типы перекатов. Режим же перекатов меняется в соответствии с изменением гидрологического режима реки. Методы прогнозов режима перекатов в условиях зарегулированной реки изложены в следующей главе.

Глава VIII

СОСТОЯНИЕ ПЕРЕКАТОВ В ЗОНЕ ВЫКЛИНИВАНИЯ ПОДПОРА И В НИЖНЕМ БЬЕФЕ ГИДРОУЗЛА

Состояние перекатов, определяющее судоходные глубины на реках, изменяется во времени как в связи с общими переформированиями русла или его отдельных участков, так и в связи с собственными деформациями переката.

В бытовых условиях режим перекатов прежде всего связан с типом руслового процесса, от которого зависит общая подвижность перекатов. Так, при изогнутом в плане русле (меандрирование) положение перекатов фиксируется плановыми контурами русла. При этом перекаты меняют свое положение в той степени, в какой изменяется положение русла в долине; при периодическом же расширении русла перекаты свободно перемещаются вниз по течению.

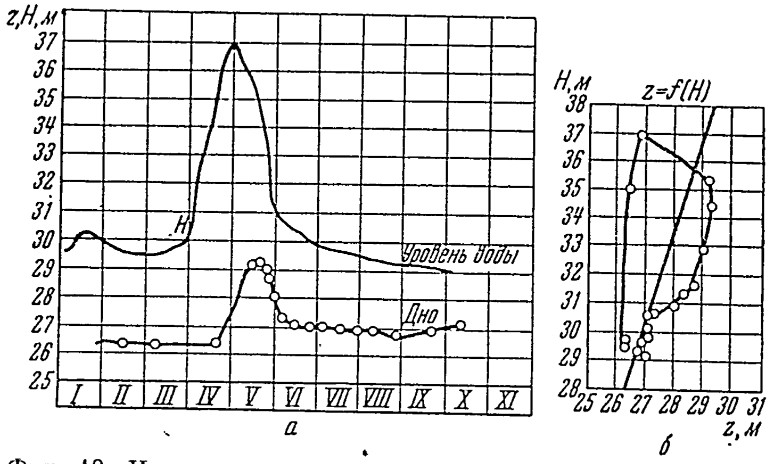
Деформации валов перекатов являются, во-первых, следствием непрерывно происходящей на перекатах передачи наносов от одного побочня к другому и, во-вторых, следствием сезонных колебаний уровней и расходов воды в реке.

Процесс передачи наносов от одного побочня к другому тесно связан с движением в реке гряд вторичного рельефа. Направление возникающей вследствие этого деформации вала зависит от особенностей переката и прежде всего — от его подвижности в направлении течения реки, т. е. от типа процесса. Движение частиц грунта во всех случаях происходит по течению; однако коллективная передача наносов может при этом происходить относительно самого переката в разных направлениях. Например, на перекатах, расположенных в местах сопряжения двух противоположных по кривизне излучин, когда перекаты сохраняют стабильное положение относительно русла, перемещение форм вторичного рельефа по валу переката происходит всегда с верхнего побочня на нижний, тогда как на перекатах в прямолинейном или слабоизогнутом русле наблюдается и обратная передача масс грунта от нижнего побочня к верхнему.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Циклические изменения отметок валов перекатов связаны с сезонными колебаниями уровней и расходов воды в реке. На большинстве перекатов, сложенных легкоподвижным грунтом, с повышением уровня воды наблюдается нарастание отметок гребней перекатов. При длительном поддержании на перекате неизменного уровня воды гребень переката стремится к определенному положению. Связь между стабильными положениями отметок гребней перекатов и соответствующими уровнями воды, при исключении влияния других факторов, достаточно близка к линейной. В среднем повышение дна



Фиг. 19. Изменение отметок гребня Кумовского переката на Дону:

а — во времени; *б* — в зависимости от изменений уровней воды

составляет примерно лишь $^1/_3$ от подъема воды, вызывающего это повышение, и, таким образом, приращение глубины на перекате составляет в среднем около $^2/_3$ от приращения уровня воды. В отдельных случаях возможны более или менее существенные отклонения от указанных средних значений. При сравнительно быстрых колебаниях уровня, происходящих, например, на реках в период прохождения половодий, изменение отметок вала переката отстает от изменений уровня воды. Это видно из фиг. 19, *а*, на которой показано изменение во времени уровней воды и соответствующих отметок гребня Кумовского переката на Дону. Следствием отставания является смещение фаз колебаний отметок вала переката и колебаний уровня воды. Это смещение бывает столь существенным, что при низких половодьях волна деформаций, развивающаяся в плесе, не успевает дойти к гребню переката до конца спада; гребень переката не нарастает, а вал переката мелеет в более глубокой верховой части.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Однако не все песчаные перекаты характеризуются таким режимом. Иногда встречаются перекаты, гребни которых понижаются с подъемом уровней воды и нарастают с понижением уровней. К ним относятся, например, перекаты, представляющие собой косы, движущиеся в пределах плесов под вогнутым берегом извилистого русла.

Перекаты сложного строения, т. е. в значительной части состоящие из песка с труднотранспортируемыми крупными частицами (гравелисто-галечные) или подстилаемые плотным грунтом, часто почти не реагируют на колебания уровней воды.

Деформации перекатов, связанные с перемещениями русла в плане и движением крупных гряд вторичного рельефа, протекают большей частью медленно. Влияние этих деформаций на судоходные глубины сравнительно невелико, так как на одних перекатах происходит размыв, а на других, наоборот, — отложение наносов. В результате этого меняется лишь положение лимитирующих судоходство участков: одни перекаты перестают быть труднопроходимыми, тогда как другие становятся такими. Общие же характеристики пути не претерпевают при этом существенных изменений.

Таким образом, для большинства равнинных рек, используемых для судоходства, наиболее существенными в отношении судоходных глубин оказываются деформации валов перекатов, связанные с колебаниями уровней воды. Изменение уровней воды происходит на всем протяжении данного судоходного плеса примерно одинаково, т. е. на всех его перекатах высота подъема, длительность стояния высоких уровней и характер межени являются сходными и колебания уровней протекают приблизительно одновременно. Это приводит к одинаковой направленности процесса деформаций на большинстве перекатов, а потому с колебаниями уровней воды связано и состояние всего судоходного плеса.

Несколько иначе обстоит дело на блуждающих реках, которым свойственна большая подвижность русла. На таких реках изменение общих форм русла происходит так быстро, что за период навигации могут существенно измениться и формы перекатов, и их состав. Некоторые перекаты исчезают совсем, другие появляются вновь. Таким образом, даже в течение одной навигации фарватер реки коренным образом изменяется. В таких условиях теряет смысл выделение тех изменений гребней перекатов, которые происходят вследствие колебаний уровней воды.

Для прогнозов судоходных глубин могут быть использованы фактические данные об изменениях глубин на перекатах при колебаниях уровней воды, если только на перекатах не устраиваются судоходные прорези. По этим данным строятся графики,

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

показывающие зависимость отметок гребней z перекатов от уровней воды H. Эти графики, один из которых представлен на фиг. 19, *б*, в дальнейшем используются для расчетов.

Особо стоит вопрос о деформациях судоходных прорезей на реках, на которых производится механическое дноуглубление. Судоходные прорези на перекатах, как правило, оказываются неустойчивыми, и для поддержания необходимых глубин требуется постоянное возобновление их. Интенсивность потери глубины в прорези зависит от подвижности наносов и при прочих равных условиях определяется скоростями течения, которые на свободных реках изменяются в зависимоти от колебаний расходов воды. Чем больше расход воды, тем интенсивнее движутся наносы и тем больше заносимость прорезей. Эта связь может быть выявлена только при осреднении данных по значительному количеству перекатов, так как даже на одном и том же перекате при одной и той же скорости течения, но при различном трассировании прорезей (что возможно в различные моменты жизни переката) его заносимость может колебаться в значительных пределах и даже может изменить знак.

Таким образом, в условиях применения механического дноуглубления вопрос о судоходных глубинах связан с прогнозом объемов ежегодного эксплуатационного землечерпания.

Учитывая, что весенними половодьями эксплуатационные прорези обычно заносятся полностью, объем грунта, который ежегодно вынимается на участке реки с песчаными перекатами, можно выразить в виде суммы следующих объемов:

1) $W_п$ — профильный объем, представляющий собой выемку в пределах заданной глубины;

2) $W_з$ — объем заносимости, выемка которого нужна для поддержания заданной глубины в течение всей навигации;

3) $W_б$ — объем багермейстерского запаса, необходимый для обеспечения определенной глубины прорези к концу работ на перекате.

Таким образом, полный объем ежегодного землечерпания можно выразить следующей суммой:

$$W = W_п + W_з + W_б\,. \tag{38}$$

Исходным материалом для подсчета являются планы перекатов данной реки и графики, выражающие зависимость скоростей потери глубины в прорезях от расходов воды. Эти графики должны строиться для каждого участка реки, лежащего между крупными притоками. Расчет нужно вести по каждому перекату в отдельности с последующим суммированием. Профильный объем $W_п$ определяется как объем

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

грунта, расположенный выше проектной отметки судового хода. Объем зависимости определяется из выражения

$$W_з = W'_з \left[1 + k\left(\frac{\Sigma c_i t_i}{h_з}\right)\right], \tag{39}$$

где $W'_з$ — объем грунта, заключенный между проектным дном и отметкой выработки, расположенной ниже проектной на величину запаса на заносимость $h_з$;

k — коэффициент, учитывающий неполноту потери объема $W'_з$ к моменту повторных черпаний, когда полностью потерян запас на заносимость в глубине черпания ($k \approx 0,5$);

c_i — среднее для интервала времени t_i значение скорости потери глубины в прорези; определяется по графику, приведенному на фиг. 13.

Объем багермейстерского запаса $W_б$ определяется из выражения

$$W_б = F \cdot h_б \cdot \frac{\Sigma c_i t_i}{h_з}, \tag{40}$$

где F — площадь прорези на уровне выработки;

$h_б$ — приведенная к площади прорези толщина слоя багермейстерского запаса при одном черпании ($h_б \approx 0,15$ м).

Изложенный метод прогноза пригоден только для оценки объемов работ на значительных участках реки и не применим к отдельным перекатам.

При устройстве гидроузлов, в связи с изменением режима расходов и уровней воды, возникает вопрос о судоходных глубинах в зоне выклинивания подпора и в нижнем бьефе (за пределами общих размывов русла). При прогнозировании судоходных глубин в проектных условиях используются полученные по натурным данным зависимости отметок гребней перекатов, устойчивости прорезей и другие от гидравлических и гидрологических характеристик рек.

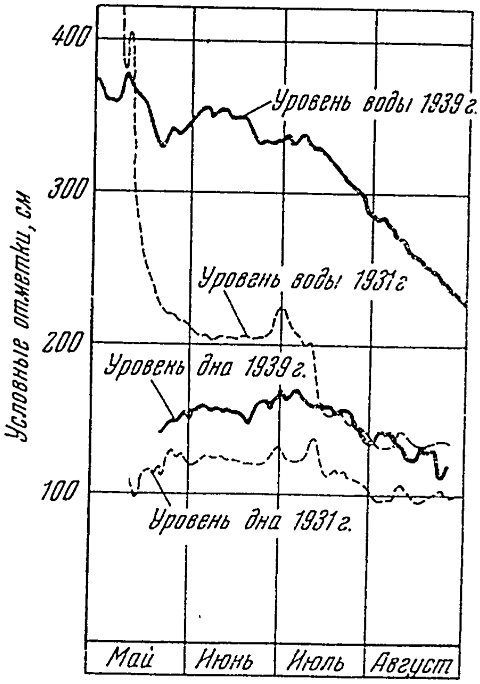
Если выше по течению нет водохранилища, регулирующего сток, то в зоне выклинивания подпора режим равнинной реки в половодье практически долгое время остается таким же, что и в бытовых условиях, а подпор образуется только в межень. В этой зоне гребни перекатов при пропуске высоких вод повышаются так же, как и в естественных условиях, а после спада половодья подпор приостанавливает размыв перекатов при повышенном против бытовых условий уровне гребня (фиг. 20). Поэтому в зоне выклинивания для прогноза могут быть применены те же соотношения, что и для бытовых условий, с той

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

оговоркой, что при наличии землечерпания для характеристики заносимости прорезей следует принимать зависимость скорости потери глубины в прорези от скорости течения, а не от расхода воды.

Расчет по бытовым соотношениям можно вести и для прогноза глубин на перекатах в нижнем бьефе. Следует лишь иметь в виду, что при наличии эксплуатационного землечерпания описанный метод прогноза в большей степени приемлем для циклов многоводных лет, когда обычно имеются значительные сбросы воды через сооружения в период половодья, или для участков со значительной приточностью, обеспечивающей существенный подъем уровней воды весной. Такие условия являются худшими, а потому их нужно рассматривать как расчетные, что гарантирует надежность получающихся при расчете результатов.



Фиг. 20. Изменение уровней воды и отметок дна на перекате в хвостовой части Иваньковского водохранилища до подпора (1931 г.) и после подпора (1939 г.)

Суточное регулирование расходов воды на гидроэлектростанциях не сказывается на состоянии перекатов, а потому при оценке судоходных глубин необходимо лишь учитывать разницу между средними и минимальными за сутки уровнями воды.

Расчеты глубин и объемов землечерпания надо вести на основе анализа форм русла, с учетом возможных особенностей его режима. В частности, необходимо выявлять особенности режима перекатов сложного строения. Следует иметь в виду, что описанные методы прогноза не могут быть распространены на длительные периоды, в течение которых, вследствие подпора и регулирования стока, может коренным образом измениться тип руслового процесса, если после выправительных работ русло не закрепляется.

Некоторые вопросы, связанные с режимом перекатов, могут решаться в лаборатории одним из методов моделирования, описанных выше. Применение метода моделирования, наряду

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

с расчетом, дает достаточно надежные результаты в тех случаях, когда в комплекс гидротехнических мероприятий включено выправление перекатов или отдельных участков русла.

Лабораторные исследования нужно проводить также для того, чтобы выяснить влияние на режим перекатов сокращения длительности половодья в нижних бьефах гидроузлов, изменения режима уровней в зонах выклинивания подпора и других аналогичных явлений. В этих случаях лабораторные исследования проводят методом изучения закономерностей.

Глава IX

ВЛИЯНИЕ МОСТОВЫХ ПЕРЕХОДОВ НА РУСЛОВОЙ ПРОЦЕСС И РУСЛОВЫЕ ДЕФОРМАЦИИ В ЗОНЕ МОСТОВЫХ ПЕРЕХОДОВ

Мостовые переходы представляют собой комплексы сооружений, возводимых в местах пересечения рек автомобильными и железными дорогами. Мостовые переходы влияют на русловой процесс, но одновременно они сами подвергаются неблагоприятному воздействию со стороны потока. Особенностью русловых процессов в местах мостовых переходов является то, что в течение многих месяцев, а иногда и лет эти процессы протекают как бы в естественных условиях, без стеснения водотока искусственными сооружениями. В периоды же высоких вод процессы эти протекают в условиях стеснения потока (подходами к мосту и регуляционными сооружениями), что значительно их осложняет. В соответствии с этим на мостовых переходах наблюдаются:

а) русловые преобразования, происходящие под действием естественного комплекса факторов, определяющих русловой процесс;

б) русловые преобразования при высоких водах, происходящие в осложненных условиях, когда естественный процесс искажается под действием сооружений мостового перехода, стесняющих поток;

в) местные русловые деформации, возникающие как результат локального изменения гидравлической структуры потока у сооружений.

Методику качественного прогноза русловых деформаций на мостовых переходах через реки разных типов и расчетные формулы для определения размеров русловых деформаций в различных конкретных случаях разработали в ЦНИС Министерства транспортного строительства О. В. Андреев и И. А. Яро-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

славцев. Деформации речного русла в любом поперечном сечении рассматриваются как следствие нарушения баланса в притоке — выносе наносов. Если приток наносов сверху по течению равен выносу наносов, то даже значительные скорости течения не могут вызвать размыв, так как уходящие с водой частички грунта сейчас же замещаются новыми, принесенными сверху. Если же приток наносов сверху по течению отсутствует или он мал по сравнению с возрастающей вниз по течению транспортирующей способностью потока, то происходит размыв. Наконец, если приток наносов превышает вынос их из данной точки в связи с падением транспортирующей способности потока по направлению движения, то происходит отложение наносов. Баланс притока — выноса наносов нарушается и в естественных условиях из-за структурных перемещений наносов скоплениями. Стеснение водотока сооружениями также может нарушить баланс в транзите наносов.

Мостовой переход может значительно исказить ход естественного руслового процесса, а в некоторых случаях даже привести к смене типа процесса. При этом характер изменения руслового процесса и изменения русла под воздействием стеснения водотока сооружениями мостового перехода различен на реках разных типов.

Изменение речных русел на равнинных меандрирующих реках

Это изменение выражается в развитии кривизны излучин, в поперечном и продольном смещениях излучин русла по пойме, в сближении петель русла выше моста (фиксирующего положение одной из излучин) и, наоборот, в раздвижке их непосредственно ниже моста. Поэтому для мостовых переходов на меандрирующих реках характерны прижимы русла к мостовым устоям (фиг. 21, *а*), прижимы речных извилин к пойменным насыпям (фиг. 21, *б*) и прижимы русла к регуляционным сооружениям (фиг. 21, *в*).

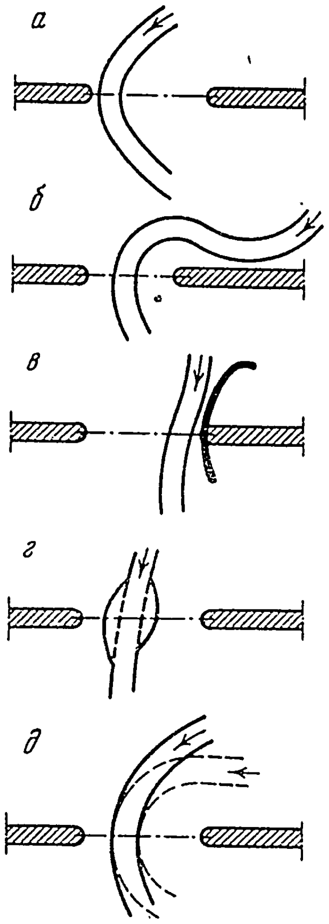
На участках мостовых переходов через реки с редко затопляемыми поймами процесс смещения излучин русла происходит почти с той же интенсивностью, что и в естественных условиях. На реках с частым затоплением пойм интенсивность и характер руслового процесса на участке мостового перехода несколько изменяются. Выше моста, в зоне подпора, возникающего при затоплении пойм, может происходить некоторая задержка движения наносов, что приводит к их дефициту на участке расположения моста и в связи с этим — к углублению русла. Стеснение пойменного потока подходами к мосту при-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

водит к увеличению расхода воды в русловой зоне, что несвойственно установившемуся расходу донных наносов, которые в паводки перемещаются. Это приводит к еще большему дефициту наносов и, как следствие, — к деформациям русла: размывам несколько выше моста, под мостом и непосредственно ниже моста (где скорость потока еще велика), а также к отложению наносов за мостом, на известном удалении от него (где транспортирующая способность потока падает и вынос наносов из-под моста превышает ее).

Для сечений вблизи моста характерны размыв пойменных участков, примыкающих к русловой зоне, в частности непосредственно в мостовом отверстии, и уширение русловой зоны (фиг. 21, г). Эти русловые изменения являются, с одной стороны, следствием увеличения руслового расхода при сжатии водотока, с другой стороны, — следствием увеличения вариации русловых расходов после стеснения водотока и необходимости приспособления размеров скоплений наносов к ежегодному значительному изменению водности потока в русле и, наконец, следствием отсутствия притока донных наносов на пойменных участках отверстий моста и дефицита их притока в русловой зоне из-за подпора. Размывы эти продолжаются до тех пор, пока скорости течения не упадут до значений неразмывающих скоростей для грунтов, слагающих русло и пойму (если расход пойменных участков велик и река практически безрусловая), или до равных русловым допускаемым (т. е. бытовым) скоростям, если расход пойменных участков незначителен и мост перекрывает поэтому практически только русловую зону реки. Двумя расчетами по этим скоростям и определяются пределы, в которых фактически находятся размеры деформаций подмостовых русел, соответствующие различным соотношениям пойменного и руслового расходов.



Фиг. 21. Изменение русел равнинных меандрирующих рек под воздействием мостового перехода

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Фиксация положения одной речной излучины мостовым отверстием приводит к тому, что кривизна ее увеличивается, излучина смещается к одному из устоев, а выше моста смещение излучин русла вниз по течению вызывает их дополнительное искривление. Развитие кривизны излучин приводит к их углублению даже при неизменном русловом расходе. В связи с этим глубины русловой зоны под мостом превышают глубины русла в естественных условиях даже в тех случаях, когда затопления пойм не часты и водный поток несколько лет подряд протекает под мостом свободно (фиг. 21, *д*).

Искривление излучин русла в сильной степени способствует задержке наносов в зоне подпора, что приводит к уширению остановившегося перед мостом побочня. Расчетные формулы для определения максимальной глубины после размыва в любой точке поперечного подмостового сечения потока различны для двух указанных выше случаев.

При расчете по первой схеме, отображающей размыв при отсутствии притока наносов, глубина

$$H_р = \frac{Q_р}{u_0 b \mu (1 - \beta)}, \tag{41}$$

где $Q_р$ — расчетный расход;

u_0 — неразмывающая скорость;

b — отверстие моста;

β — относительная ширина мостовых опор;

μ — коэффициент местного сжатия.

Равномерное распределение размыва по ширине подмостового сечения потока предполагается в связи с тем, что при устройстве пойменных струенаправляющих дамб, обычных для мостовых переходов, достигается равномерное или почти равномерное распределение элементарных расходов воды по ширине сечения.

При расчете по второй схеме, применяемой в условиях динамического равновесия русла, т. е. баланса в притоке — выносе наносов, глубина равна

$$H_р = pH, \tag{42}$$

где p — заданный при расчете отверстия моста коэффициент размыва, допустимый по конструкции опор, равный

$$p = \frac{u_{расч}}{u_{быт}};$$

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

H — глубина, которая может образоваться на данной вертикали как в ходе естественного руслового процесса, так и при осложнении его в связи с постройкой мостового перехода.

Учету подлежат следующие факторы: боковое смещение русла под мостом, увеличение глубины при росте кривизны речной излучины, смещение больших глубин русла под мост и дефицит наносов на пойменных участках отверстия моста (по соответствующим формулам).

Изменение русел равнинных немеандрирующих рек

Изменение происходит в связи со структурным перемещением значительных скоплений наносов. При продольном перемещении скоплений наносов происходит боковое перемещение наибольшей глубины в поперечном сечении русла. Поэтому в каждой точке подмостового сечения русла водотока при переходе через равнинную немеандрирующую реку глубина периодически меняется от наименьшей до наибольшей перекатной в средних частях русла, где могут проходить только мелкие скопления наносов, перемещающиеся от побочня к побочню, и до наибольшей плесовой глубины в боковых частях русловой зоны, где может происходить размыв берега русла под воздействием побочня, проходящего у противоположного берега (фиг. 22, *а*).

Для мостовых переходов через равнинные немеандрирующие реки изменение кривизны русловой зоны не характерно. Русловая же зона под действием руслового расхода, увеличенного ввиду сжатия водотока, уширяется и в этом случае (фиг. 22, *б*). Размыв пойменных участков мостового отверстия в таких условиях обычно менее интенсивен, чем на меандрирующих реках (если он вообще возможен на заросших травой поймах), вследствие значительного руслового расхода и меньшего пойменного регулирования расходов немеандрирующих рек. Поэтому размывы подмостового сечения на реках этого типа определяются главным образом русловыми допускаемыми (т. е. бытовыми) скоростями. Однако влияние подпора, возникающего при стеснении водотока мостовым переходом, может приводить и в этом случае к временному дефициту наносов в подмостовом поперечном сечении русла, и поэтому глубины в нем могут временно возрастать до тех пор, пока не установится новый уклон для участка реки у мостового перехода.

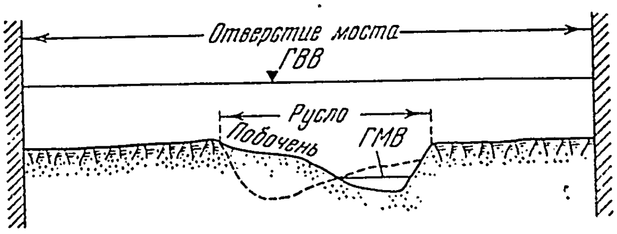
Обычно мостовые переходы не стесняют русловую зону равнинных рек. Если же по каким-либо причинам русловая зона стеснена, то это приводит к задержке структурного движения скоплений наносов, разрушению берегов русла, деформациям

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

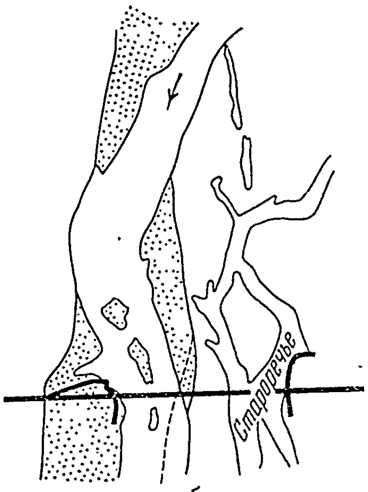
Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

и разрушению побочней и в дополнение к нарушенной побочневой форме, к появлению островной формы переноса наносов (фиг. 22, *б*).

Расчет максимальных глубин после размыва в любой точке подмостового поперечного сечения потока производится по



а



б

Фиг. 22. Изменение русел равнинных немеандрирующих рек под воздействием мостового перехода:
а — при продольном перемещении скопления наносов;
б — при стеснении русловой зоны (размыв коренного берега)

приведенной выше второй расчетной схеме. При этом глубину до размыва H следует принимать с учетом описанных факторов, характерных для рек этого типа.

Изменение русел блуждающих рек

Изменение может происходить часто и не имеет определенного характера ввиду почти непрерывного приспособления русловых форм к гидрологическим условиям, резко и много-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

кратно меняющимся из года в год и даже в течение одного года. Избыточная ширина русловой зоны определяет сначала длительную задержку огромных скоплений наносов, почти не передвигающихся даже в высокие паводки, а в дальнейшем — интенсификацию их движения, что приводит к резкому изменению распределения глубин по поперечному сечению реки. Образование рукавов в результате структурного перемещения скоплений наносов и неравномерное распределение расхода между отдельными рукавами также приводят к резкому изменению глубин от паводка к паводку в каждой данной точке поперечного сечения реки.

При мостовых переходах через блуждающие реки русловая зона часто весьма значительно стеснена подходами к мосту. Это не вызывает смены типа руслового процесса при сжатии ее только до определенного предела. Если русловая зона стеснена незначительно, это не вызывает изменения средней глубины водотока. При большом сжатии, превышающем определенный предел, средняя глубина водотока начинает возрастать с увеличением стеснения; при этом тип руслового процесса водотока изменяется, блуждание прекращается, и река становится равнинной, немеандрирующей, с жестко фиксированными берегами, вдоль которых перемещаются побочни, причем ширина русловой зоны в этих условиях уже не является избыточной. Непременным условием для смены типа руслового процесса является стеснение русловой зоны на значительном участке, на котором могут разместиться характерные для равнинных немеандрирующих рек скопления донных наносов в виде побочней. В этом случае водоток становится практически однорукавным.

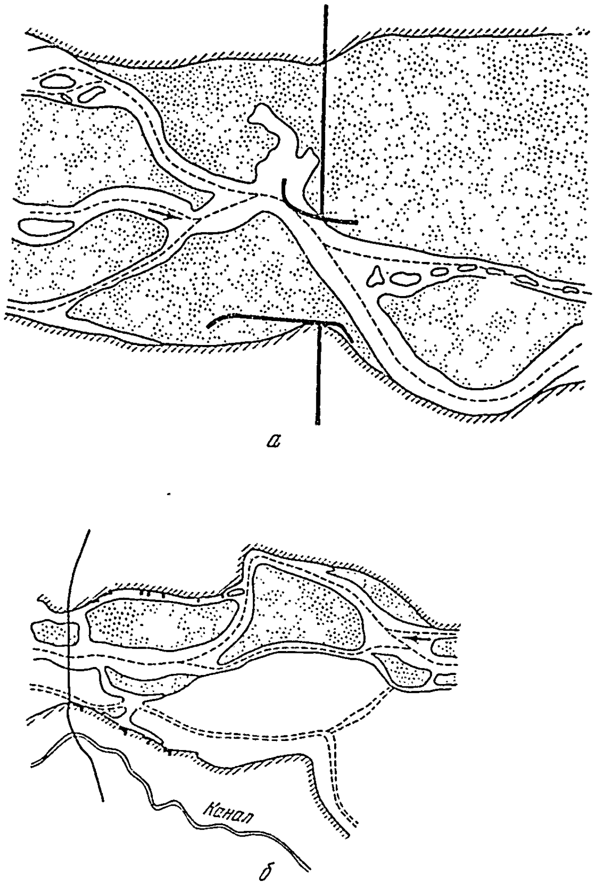
Стеснение реки лишь на малом протяжении способствует закреплению побочней (как и на меандрирующих реках), располагающихся в этих случаях вблизи моста выше и ниже его. Такой характер русловых изменений обусловлен тем, что резкое стеснение русловой зоны блуждающей реки на коротком протяжении приводит к торможению скопленных наносов перед мостовым отверстием, недостаточным для их пропуска, объединению мелких скоплений в более крупные, расширению этих скоплений. Описанные изменения русловых форм приводят, с одной стороны, к «свалу» водного потока к берегам русловой зоны, устоям и подходам к мосту (фиг. 23, *а*), что создает опасность их подмыва, а с другой — к задержке наносов перед сжатым сечением, что вызывает временный дефицит притока наносов и значительные размывы в подмостовом сечении, в частности, и у промежуточных опор моста — быков. Баланс в транзите наносов восстанавливается только после того, как выработается новый продольный профиль реки, соответствую-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

щий пропуску расхода наносов на уменьшенной ширине русловой зоны.

Торможение и расширение скоплений наносов перед мостовым переходом или участком сжатия русловой зоны приводят к специфической форме размыва берегов в виде глубоких, опасных для сооружений западин (фиг. 23, *б*). Как правило,



Фиг. 23. Изменение русел блуждающих рек под воздействием мостового перехода:

а — свал водного потока к берегам русловой зоны; *б* — размывы берегов русловой зоны

такие размывы происходят в головной части зарегулированного предмостового участка реки на одном берегу, а после смены положения основного рукава русловой зоны они могут возникнуть на другом берегу, с одновременным заилением места размыва на противоположном.

Размывы берегов русловой зоны у сооружений мостового перехода и размыв берегов отдельных рукавов внутри русло-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

вой зоны усиливаются из-за неблагоприятного направления течений, в отдельных случаях — нормальных или почти нормальных — к берегам и сооружениям. При этом наиболее опасными в отношении размыва на блуждающих реках оказываются не самые высокие паводки, когда скопления наносов значительно затоплены и направление течений на берега и сооружения практически невозможно (течение спрямлено), а средние уровни, когда скорости течения еще велики, направление же течений, определяемое наличием в русле скоплений наносов, особенно неблагоприятно. Именно этим объясняется тот факт, что повреждения мостов через блуждающие реки чаще всего наблюдаются не при высоких паводках. Изменение скоростей и направления течения при различных уровнях воды схематически показано на фиг. 24, *а*.

Определение размывов под мостами через блуждающие реки производится по следующей (третьей) расчетной схеме.

По натуральным данным строятся три графика (фиг 24, *б*)

$$\psi = f(B_р), \quad H_{ср} = f(\psi), \quad H_м = \varphi(\psi),$$

где ψ — коэффициент блуждания, равный отношению ширины русловой зоны ($B_р$) к ширине межени ($B_м$);

$H_{ср}$ — средняя глубина сечения русла при расчетном паводке;

$H_м$ — средняя глубина межени.

С использованием этих графиков строится схематизированное поперечное подмостовое сечение русла (фиг. 24, *в*), для чего расчетом определяется глубина воды при паводке над побочнем

$$H_п = \frac{H_{ср} B_р - B_м (H_м + A)}{B_р - B_м}, \tag{43}$$

где величина $B_р$ принимается равной заданной ширине отверстия моста.

A — амплитуда колебаний уровня воды (см. фиг. 24, *в*).

Максимально возможная глубина в подмостовом сечении в расчетный паводок определяется с учетом задержки наносов перед мостом по формуле

$$H_{макс} = (H_м + A) \frac{u_м}{u_н}, \tag{44}$$

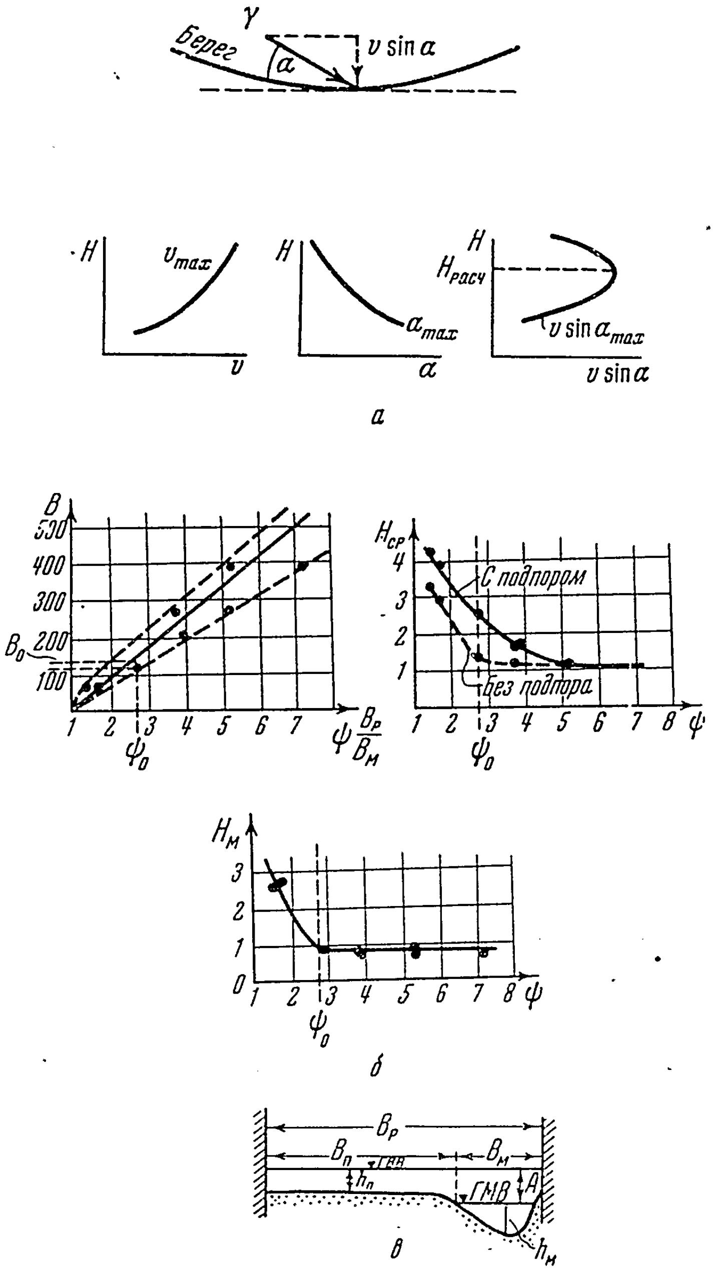
где $u_м$ — средняя скорость в сформированном подмостовом русле;

$u_н$ — неразмывающая скорость для тех фракций грунтов русла, которые находятся на ожидаемой глубине размыва, а не на поверхности отмелей.

Этот расчет может быть уточнен, если применить уравнение баланса движения наносов.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2



Фиг. 24. Расчетные графики и схемы к определению размывов на блуждающих реках:

а — изменение скоростей и направления течений при разных уровнях воды; *б* — расчетные графики для определения размывов под мостами; *в* — схематизированное поперечное подмостовое сечение русла

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

К общим русловым деформациям на участках мостовых переходов, вызванным естественным ходом руслового процесса и осложнениями его из-за изменения гидрологического режима русловой зоны и пойм под влиянием стеснения водотока подходами к мосту, добавляются местные деформации. Они вызываются местным увеличением скоростей и элементарных расходов в результате набега потока на сооружения мостового перехода (в том числе регуляционные) и усиливаются вторичными течениями, возникающими в потоке у инженерных сооружений.

При отсутствии каких-либо специальных сооружений, подводящих поток к мостовому отверстию, в потоке у конусов моста возникают местные повышения скорости, которые отчетливо прослеживаются, если дно водотока в этих местах неразмываемое. Если же дно размываемое, то оно разрушается и скорости падают при сохранении повышенных элементарных расходов.

Набегание поименного потока на подходы к мосту в сочетании с поворотом струй к мостовому отверстию создает в потоке вторичные (циркуляционные) течения, отметающие продукты размыва от насыпи и конуса моста, что создает угрозу их подмыва и приводит к дефициту наносов в зоне размыва. Поэтому глубина размыва в этом месте соответствует скорости, не размывающей грунт. Непосредственно под мостом направление вторичных (циркуляционных) течений меняет знак из-за изменения знака кривизны водных струй. Продукты местного размыва в подмостовом сечении выносятся этими течениями в зону ниже моста и в сторону от оси потока, где и откладываются.

Значительные местные деформации наблюдаются и у промежуточных опор мостов; они возникают также под влиянием набега потока на опоры, в результате чего у опор появляются нисходящие токи, интенсивно размывающие дно.

Для защиты мостов и подходов к ним от русловых деформаций, как общего так и местного характера, возводятся регуляционные (защитные) сооружения, при помощи которых русловые деформации или уменьшаются или отодвигаются от основных (транспортных) сооружений перехода. Эти защитные сооружения при русловых деформациях, главным образом местных, подвергаются опасности повреждения.

Расчет местных размывов производится по приведенным ниже формулам. Глубина потока у конуса моста после местного размыва, вызванного концентрацией струй, равна

$$H_{п} = \frac{Q_{п}}{b_{п} u_{п}} \frac{2\varepsilon}{1+\varepsilon}, \qquad (45)$$

где $Q_{п}$ — расход на пойменном участке отверстия моста;

$b_{п}$ — ширина пойменного участка отверстия моста;

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

ε — коэффициент неравномерности распределения скоростей по ширине участка, который при отсутствии струенаправляющих дамб равен 4, а при рациональных дамбах — 1.

Местный размыв (глубина воронки) у промежуточных опор мостов определяется формулой

$$H_в = k_\xi k_u (1 + k_н) \frac{u^2}{g} - 30d, \qquad (46)$$

где k_ξ — коэффициент формы опор, равный 8,5 для закругленных граней опор и 12,4 для прямоугольных опор;

k_u — коэффициент, учитывающий ширину опоры;

$\lg k_u = -0{,}28 \sqrt[3]{\frac{u^2}{gb}}$;

$k_н$ — коэффициент, учитывающий глубину потока;

$\lg k_н = -0{,}17 - 0{,}35 \frac{H}{b}$;

u — скорость набегания потока на опору;

d — средний диаметр наиболее крупных фракций грунта, не менее 15% которых находятся во взвешенном состоянии.

Глубины воронок местных размывов у регуляционных сооружений подсчитываются по формуле

$$H_в = 27{,}5\ k_m \sin^2\alpha \frac{u^2}{g} - 30\,d, \qquad (47)$$

где α — угол между направлением набегающей струи и осью сооружения;

$k_m = 10^{-0,1m}$ — коэффициент, учитывающий крутизну откоса сооружения; m — коэффициент откоса.

У голов русловых регуляционных сооружений глубины воронок местных размывов равны

$$H_в = 27{,}5\ k_c^2 k_m \sin^2(\alpha + \varphi) \frac{u^2}{g} - 30\,d, \qquad (48)$$

где k_c — коэффициент увеличения скорости, зависящий от степени стеснения потока в русле сооружением;

$\varphi = 0{,}15 \frac{gl}{u^2}$ — угол общего отклонения потока сооружением от бытового направления;

l — длина сооружения.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Глава X

НАПРАВЛЕНИЕ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАБОТЫ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Дальнейшее успешное развитие методов инженерного прогноза общих русловых процессов зависит прежде всего от степени совершенствования самой теории русловых процессов. Одной из задач, требующей скорейшего решения, является создание общей теории, которая в настоящее время развита еще слабо: отсутствуют общепризнанные теоретические положения и единая общая методология исследований, что значительно тормозит и развитие методов прогноза.

С точки зрения инженерной практики, наиболее важным разделом общей теории является теория переформирований русла, сложенного легкоподвижными грунтами. Главная задача в этой области состоит в уточнении условий, определяющих тип руслового процесса с количественной оценкой соответствующих характеристик. Эта сравнительно широкая задача не может быть решена без более глубокого проникновения в механизм процессов, без изучения их деталей.

Для оценки подвижности дна, т. е. в конечном счете скоростей перемещения структурных форм донного рельефа, необходимо надлежащим образом изучить грядовую форму перемещения твердого материала в русле. Оценка поперечных перемещений русла требует более детального изучения элементов поперечного баланса наносов и, в частности, — поперечной передачи наносов по подвальям гряд, а также изучения механизма разрушения пойменных берегов и механизма наращивания их взвешенными наносами. Изучение поперечного баланса наносов имеет большое значение также в связи с тем, что оно должно помочь выяснить соотношения между характеристиками поперечного сечения русла и гидрологическими и геоморфологическими факторами, которые до сих пор выражаются чисто эмпирическими связями. Особое внимание при этом следует обратить на геологические факторы, которые по сравнению с гидрологическими учитываются все еще недостаточно.

Явления продольного транспорта наносов, их поперечной передачи, формирование гряд и т. п. не могут быть по-настоящему исследованы без глубокого проникновения в гидравлику потока, без изучения деталей его структуры. Необходимо прежде всего изучить турбулентность потока, обратив особое внимание на скоростной режим придонной области потока. Изучение турбулентности должно быть связано с исследованием осредненного по времени движения. Более глубоко должны

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

быть изучены также поперечная циркуляция, возникающая на изгибах русла, в местах деления русла на рукава, на прямолинейных участках русла под коренными берегами (под влиянием кориолисовых ускорений), винтовые течения в подвальях гряд, а в связи с этим и распределения продольных скоростей в условиях наличия гряд, поперечной циркуляции и т. п. Надлежащее изучение гидравлики потока позволит уточнить не только теоретические представления о транспорте твердого материала, но и методы расчета русловых деформаций.

На деформации русла оказывают влияние ледовый и термический режимы реки, которые также должны быть подвергнуты изучению.

Особо стоит вопрос об изучении влияния инженерных сооружений на режим русла. В этой области теория наиболее разработана, так как она непосредственно соприкасается с практикой гидротехнического строительства. Однако многие стороны процесса еще не вполне исследованы. Особенно это относится к влиянию сооружений на плановые деформации русла и тип руслового процесса. Для изучения русловых деформаций под воздействием инженерных сооружений необходимо в дальнейшем развивать и совершенствовать натурные наблюдения за режимом бьефов существующих гидроузлов.

Наряду с изучением крупных рек большое внимание следует уделять и малым рекам, особенности режима русел которых почти не изучены.

Развитие теории должно способствовать разработке новых методов прогнозирования русловых процессов. При уточнении условий, определяющих тип процесса, применение теоретического анализа, дополненное использованием морфометрических связей, позволит перейти от прогноза деформаций русла в плане к оценке также изменений тех или иных высотных морфологических характеристик.

Совершенствование метода баланса твердого материала должно быть направлено по пути использования в расчетах плановых смещений русла и уточнения связей твердого расхода с гидравлическими характеристиками потока.

Усложнение метода баланса по мере расширения задачи, т. е. перехода от задачи о глубинах к пространственному решению, вызовет необходимость упрощения методов расчета с сохранением требуемой точности расчета.

Методы моделирования требуют дальнейшего усовершенствования приемов управления русловым процессом в лабораторных условиях, а также уточнения масштабных соотношений. Для воспроизведения руслового процесса определенного типа необходимо выработать правила обеспечения заданной относительной подвижности дна и берегов. Особое внимание должно

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

быть уделено установлению приемов воспроизведения поймы, в формировании которой в естественных условиях решающую роль играют растительность и мелкие твердые частицы в потоке, образующие при оседании на пойме покровные связанные грунты. В связи с этим большое значение приобретает разработка методики моделирования взвешенных наносов, которая важна также и при исследовании заиления водохранилищ.

Как и расчетные методы, методы моделирования требуют уточнения связей между твердым и жидким расходами. Дальнейшему уточнению и развитию должны быть также подвергнуты методы моделирования и расчета местных деформаций, оказывающих значительное влияние на нормальную работу гидротехнических сооружений.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

К. И. РОССИНСКИЙ

МЕСТНЫЙ РАЗМЫВ РЕЧНОГО ДНА В НИЖНИХ БЬЕФАХ КРУПНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Доложено 29 июня 1951 г. на Ученом совете секции по научной разработке проблем водного хозяйства АН СССР

Глава I

ЗАДАЧИ РАБОТЫ

§ 1. Направление исследований

К наиболее сложным явлениям, сопутствующим возведению плотин на реках и каналах, относится местный размыв дна в нижнем бьефе водосбросных сооружений.

Несмотря на то, что это явление изучается уже давно, многие стороны его не освещены еще с такой полнотой, которая позволила бы рационально намечать мероприятия по защите сооружений от подмыва.

Исследования в области местного размыва получили особенно широкий размах в СССР в связи с запросами гидротехнического строительства. Советской гидротехнике впервые в мировой практике приходится решать сложные задачи по возведению высоких водосливных плотин на крупнейших реках при отсутствии скальных пород, которые могли бы быть использованы как надежное, неразмываемое основание.

Гигантские гидроузлы, строящиеся на легкоразмываемых основаниях в условиях Волги, Камы, Днепра, Дона и других рек, нуждаются в надежных и экономичных мерах защиты от подмыва со стороны нижнего бьефа. Для проектирования столь крупных и ответственных сооружений приемы оценки условий размыва дна в нижнем бьефе, ранее разработанные гидротехнической теорией, стали недостаточными. Возникла необходимость в более глубоких исследованиях, которые по возможности

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

полно учитывали бы определяющие факторы, обеспечивали бы возможность надежного инженерного расчета размывов дна и правильно ориентировали бы мероприятия по защите сооружений.

Материал наблюдений и экспериментов, проведенных за последние годы в натурных условиях и в лабораториях, создал необходимую опорную базу для таких построений, позволил разобраться в природе явлений и наметить пути к их количественной оценке. Наряду с этим наблюдения вскрыли новые обстоятельства, оказывающие влияние на условия формирования ямы местного размыва, которые ранее или ускользали от внимания исследователей или не могли быть изучены из-за сложности требуемого эксперимента.

В настоящей работе предпринята попытка осветить некоторые стороны явления местного размыва и наметить возможные приемы определения его глубины применительно к крупным водосливным плотинам и гидростанциям, возводимым на мягких (нескальных) основаниях. Режим нижнего бьефа таких сооружений проектируется преимущественно затопленный; размыв дна при этом происходит под действием горизонтально направленного потока.

Так как процесс размыва дна реки за сооружениями представляет собой результат взаимодействия между потоком и породами его ложа, то исследование включает два тесно связанных между собой раздела.

Первый из них посвящается выяснению гидравлического режима потока, поступающего в яму размыва с водосбросных сооружений. Исследование гидравлического режима потока в нижнем бьефе начинается с анализа приведенных к линейной задаче (т. е. осредненных по глубине и ширине некоторой части потока) гидравлических элементов. В этой части исследования намечается ответ на вопрос о причинах сужения в плане струи, поступающей в нижний бьеф. Такое усиливающее размыв явление было отмечено многими экспериментаторами. Объяснение его имеет существенное значение для понимания условий движения потока в нижнем бьефе водосбросных сооружений и для выяснения воздействия его на размываемое ложе.

Следующий цикл гидравлических вопросов, рассматриваемых в работе и получивших в ней решение, касается методики расчета распределения скоростей в сечениях потока (эпюра распределения скоростей на вертикали) за рисбермой. В основе предлагаемой методики лежит представление о турбулентном перемешивании как о факторе, приводящем к диффузии количеств движения. Рассматриваемая методика дает возможность предвычислять распределение скоростей в различных сечениях потока, движущегося в нижнем бьефе. Это решение исполь-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

зуется при исследовании гидравлического режима потока и при изучении его воздействия на дно.

Второй раздел посвящен анализу собственно местного размыва дна в нижнем бьефе. В этом разделе рассмотрен процесс формирования местного размыва и показаны возможные приемы расчета его глубины в условиях плоского потока; разобрано влияние пространственных условий на характер и величину размыва, а также влияние крупнозернистых включений, содержащихся в грунте.

Сложность и многообразие исследуемого явления затрудняют в настоящее время разработку обоснованных приемов расчета для всех случаев гидравлического режима. Для этого нужно дальнейшее накопление экспериментального материала. Ввиду недостаточности такого материала для некоторых случаев в работе показаны лишь пути возможных решений или даны рекомендации, не претендующие на строгость и полноту решения.

Кроме перечисленных выше вопросов, в конце настоящего исследования рассмотрена работа заранее создаваемого за рисбермой углубления — ковша с точки зрения влияния его на глубину размыва.

§ 2. Существующие приемы расчета глубин местного размыва

Подавляющее большинство расчетных формул и приемов для определения глубины местного размыва принадлежит советским исследователям. Значительную группу составляют формулы, предложенные для расчета размыва дна свободно падающей струей. Решению этой задачи посвящены построения Б. А. Мацмана [1], теоретическая формула А. Н. Патрашева [2] и эмпирические формулы Шоклича (Schoklitsch) [3] и др. исследователей.

Для расчета размыва дна за рисбермами плотин сбегающим с них горизонтальным потоком имеется ряд предложений, отличающихся друг от друга подходом к решению задачи и, следовательно, характером расчетных зависимостей. Эти предложения можно разделить на три группы. К первой следует отнести формулы М. С. Вызго [4, 5] и сходные с ними зависимости Н. Т. Смолянинова [6]. Вторую группу составляют предложения Е. А. Замарина [7] и И. И. Леви [8]. Решения этих авторов дают законченные расчетные зависимости с числовыми коэффициентами, но, как будет показано ниже, относятся к частным случаям гидравлического режима нижнего бьефа.

В отличие от первых двух групп, третья группа объединяет работы, в которых делаются попытки дать общее решение за-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

дачи. К ним относятся работы С. В. Избаша [9] и И. А. Тер-Аракеляна [10]. Однако зависимости этих авторов даются в общем виде без числовых коэффициентов и пока не могут быть использованы как расчетные.

Формулы А. Н. Патрашева [2], Шоклича [3] и Теперина сходны друг с другом и в общем виде могут быть представлены следующим выражением

$$h = Kq^m p^n,$$

где K — коэффициент, зависящий от рода грунта; по Патрашеву для метровых размеров $K = \frac{3,9}{\sqrt[4]{d_{90}}}$,

по Шокличу $K = \frac{10,4}{d_{90}^{0,32}}$,

где d_{90} — диаметр зерен в миллиметрах, меньше которого в грунте содержится 90% частиц по весу (в формуле Теперина вместо диаметра частиц вводится неразмывающая скорость);

q — удельный расход воды;

p — перепад, исправленный на скорость подхода;

m и n — показатели степени.

По Патрашеву $m = 0,5$, $n = 0,25$, по Шокличу $m = 0,57$, $n = 0,20$, по Теперину $m = 0,62$ и $n = 0,22$.

Упомянутые формулы опубликованы в период с 1932 по 1937 г. Несколько раньше прием расчета размыва падающей струей был предложен Б. А. Мацманом [1]. Прием этот построен на предположении, что размыв заканчивается при затоплении струи, которое наступает с углублением дна.

Так как размыв свободно падающей струей не является предметом настоящей работы, то анализ перечисленных выше формул здесь не приводится. Следует отметить лишь общность их структуры, которая дает основание предполагать, что эти формулы более или менее отражают явления и применимы при оценке глубины размыва для несвязных грунтов. Параметры, входящие в формулы, должны уточняться по мере накопления фактического материала.

Близкую по начертанию формулу для расчета глубины размыва за плотинами горизонтальной струей воды мы находим в работах М. С. Вызго [4].

М. С. Вызго использовал упомянутую выше идею Б. А. Мацмана о прекращении размыва после затопления струи и провел дальнейшие построения, опираясь на формулу сопряженных глубин

$$h = \tau h_2 = \tau \frac{h_1}{2}\left[\sqrt{1 + \frac{8q^2}{gh_1^3}} - 1\right],$$

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

где h — глубина воды в яме размыва;
τ — коэффициент;
h_1 — глубина воды на водобое;
h_2 — вторая, сопряженная с h_1 глубина;
g — ускорение силы тяжести.

Пренебрегая единицами, что допустимо лишь при значениях $\frac{8q^2}{gh^3}$, значительно бо́льших, чем единица, и заменяя h_1 через $\frac{q}{\sqrt{2gp}}$, М. С. Вызго приходит к равенству

$$h = \tau h_2 = 0{,}95\,\tau q^{0,50} p^{0,25},$$

которое в окончательном виде записывается так:

$$h = k\sqrt{q\sqrt{p}}\,.$$

М. С. Вызго считает коэффициент K зависящим от угла наклона струи в месте входа ее в нижний бьеф. Позднее автор ввел в формулу коэффициент A, учитывающий аэрацию струи [5].

Величины K и A приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Коэффициент аэрации A

Глубина воды на водобое h_0, м	Скорость течения на водобое u_0, м/сек				
	5	10	15	20	25
0,2	0,70	0,64	0,62	0,61	0,60
0,5	0,88	0,71	0,66	0,68	0,62
0,7	1,00	0,90	0,70	0,66	0,64

Таблица 2

Коэффициент размыва K

Грунты	Значения β, градусы					
	0	12	25	40	60	90
Обычные грунты и скала (после длительного размыва)	1,4	1,7	2,0	2,4	2,7	3,3
Очень слабые грунты (плывуны)	1,4	1,8	2,4	2,8	3,3	4,5

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Для размыва горизонтальной струей без учета аэрации глубина воды в месте наибольшего размыва, согласно таблицам, будет

$$h = 1{,}4\ q^{0{,}5} p^{0{,}25}.$$

Полученная по этой формуле глубина должна (по М. С. Вызго) удовлетворять неравенству

$$h \geqslant \frac{q}{U_h},$$

в которой U_h означает величину неразмывающей скорости.

При несоблюдении неравенства глубина воды в месте максимального размыва принимается

$$h = \frac{q}{U_h}.$$

Коэффициент 1,4 получен в результате теоретических построений [4]. Для его определения явление подтопления струи в пределах ямы размыва условно рассматривается как сумма двух, не зависящих друг от друга прыжков: верхнего с вальцом над струей и нижнего с вальцом под струей, возникающим вследствие образования ямы размыва. При этом принимается, что нижний прыжок представляет собой зеркальное изображение верхнего. В итоге получается вывод, что вторая сопряженная глубина для размытого дна в 1,4 раза больше второй сопряженной глубины, получаемой обычно для горизонтального дна. Нетрудно убедиться в ошибочности такого построения: давления внутри жидкости возрастают с глубиной и не могут рассматриваться в нижней половине потока как зеркальное изображение давлений в верхней половине. Поэтому и коэффициент 1,4 не может считаться обоснованным.

Оценивая формулу М. С. Вызго, можно прийти к следующим выводам.

1. Так как глубина в месте размыва определяется как сопряженная с глубиной в конце водобоя или рисбермы, то рассматриваемая формула должна относиться только к случаям размыва дна сжатой струей при отогнанном прыжке.

2. По смыслу построений М. С. Вызго, глубина размыва не зависит от рода грунта. В действительности такое положение может иметь место в некоторых случаях отогнанного режима, когда вместе с углублением потока в процессе размыва дна происходит подтопление прыжка. Одинаковая глубина размыва для различных грунтов будет устанавливаться тогда, когда за рисбермой до размыва дна скорость течения сжатой струи будет больше размывающей скорости для самого прочного скального грунта, а после размыва в момент накатывания прыжка на размытую часть русла скорость течения сразу

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

(скачком) снизится до неразмывающих скоростей, соответствующих самому подвижному грунту. Если же это условие не соблюдается, то в грунтах, неразмывающие скорости которых выходят за названные выше границы, глубина размыва будет зависеть от качества грунтов, от их способности сопротивляться размыву.

Поэтому возникла необходимость ограничивать применение формулы соблюдением неравенства $h \geqslant \frac{q}{U_h}$.

Следует иметь в виду, что значения неразмывающей скорости U_h при размыве дна отогнанной струей могут быть значительно (раза в полтора) меньше нормативных неразмывающих скоростей, которые обычно определяются на основании экспериментов, проводимых в равномерных потоках.

3. Формула должна давать правильный результат при $\frac{8q^2}{qh_1^3} > 25$. Для $\frac{8q^2}{qh_1^3} < 25$ пренебрежение единицами в уравнении сопряженных глубин приводит к ошибке свыше 20%.

4. Коэффициент K в формуле требует уточнения, основанного на опытах и наблюдениях.

В 1951 г. Н. Т. Смолянинов [6] опубликовал результаты исследований местного размыва на модели водосливной плотины, проведенных в лаборатории Института сооружений Академии наук Узбекской ССР. Масштаб модели в работе не указан. Судить о нем можно только по величине перепада на сооружении, который равнялся 0,32 *м*. Опыты проведены при разных углах падения струи, доходивших до 70°, различных удельных расходах, менявшихся от 0,007 до 0,140 *м²/сек*, и для семи грунтовых смесей со средним диаметром частиц от 0,4 до 45 *мм*. Результаты опытов Н. Т. Смолянинов приводит в виде графиков (фиг. 1).

Кроме того, автор дает две эмпирические зависимости, связывающие глубину воды в месте наибольшего размыва с гидравлическими элементами потока и средним диаметром частиц, слагающих дно ниже сооружения.

Одна из этих зависимостей относится к случаям, когда струя опускается на дно ямы размыва, что соответствует большим углам падения струи:

$$h = p^{0,5}(1,75q^{0,5} + 0,20 - 0,265\sqrt{d}).$$

Здесь все величины выражены в метрах за исключением d, которая дана в сантиметрах.

Вторая зависимость дается для поверхностного режима в яме размыва при малых углах входа струи в нижний бьеф:

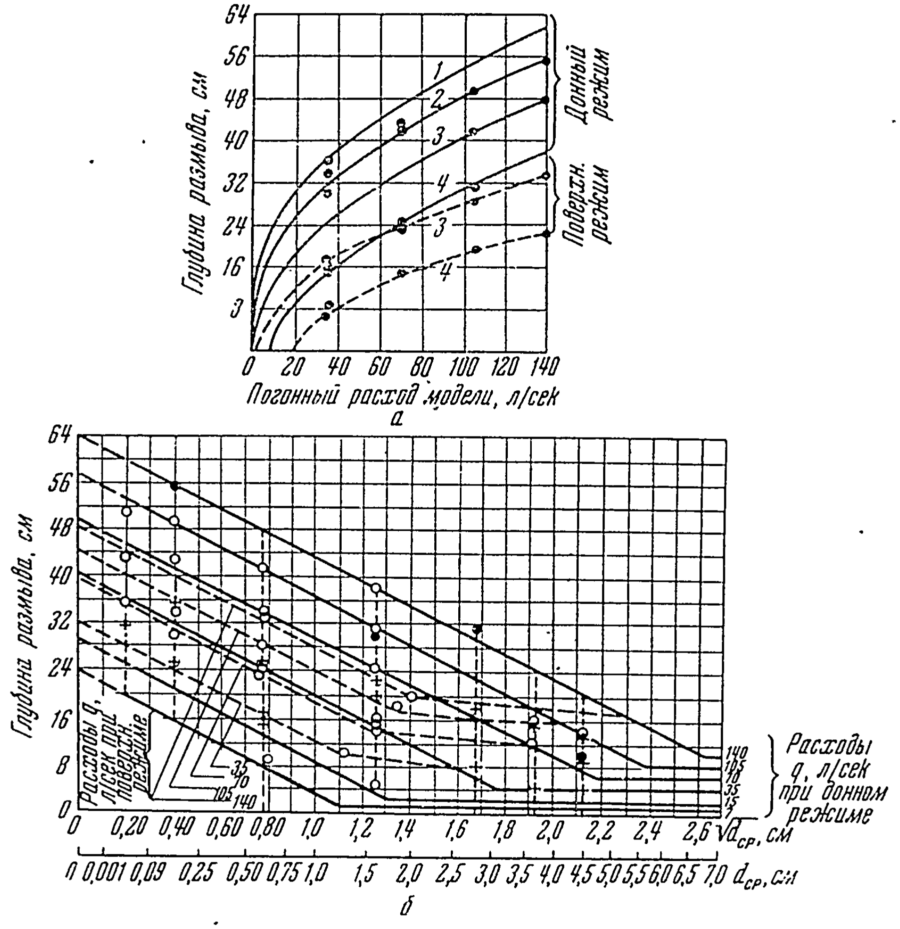
$$h = p^{0,5}(1,20q^{0,5} + 0,20 - 0,265\sqrt{d}).$$

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Последнее равенство охватывает случай размыва горизонтальной струей.

Н. Т. Смолянинов отмечает, что опыты не показали существенного влияния угла падения струи на глубину размыва. Это положение нашло отражение в приведенных выше зависимостях.



Фиг. 1. Зависимости глубин размыва от удельных расходов воды и крупности частиц грунта по опытам Н. Т. Смолянинова:
1 — $d_{ср}$ = 0,4 мм; 2 — $d_{ср}$ = 1,5 мм; 3 — $d_{ср}$ = 6 мм; 4 — $d_{ср}$ = 16 мм; ○ ● — донный режим; + — поверхностный режим

Для расчета глубины размыва в слабосвязных грунтах предлагается применять те же зависимости, принимая в них $d=0$.

Рассматривая график *б* фиг. 1, можно убедиться в правильности положения М. С. Вызго о независимости в известных случаях глубины размыва от крупности частиц грунта. Дей-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

ствительно, в правом углу графика наклонные линии связи $h=f(\sqrt{d})$ переходят в линии, параллельные оси абсцисс. Это свидетельствует о том, что глубина размыва, начиная с некоторого значения $\sqrt{d}$, перестает уменьшаться с увеличением диаметра.

График подтверждает также правильность сделанного выше вывода о том, что пределы применимости формулы М. С. Вызго зависят от величины удельных расходов воды и способности грунта сопротивляться размыву. Чем больше удельный расход, тем при большем значении $\sqrt{d}$ линии $h=f(\sqrt{d})$ переходят на графике в прямые, параллельные оси абсцисс.

Что касается зависимостей, предложенных Н. Т. Смоляниновым, то они, как чисто эмпирические, не могут экстраполироваться за пределы опыта, тем более, что размерность их не выдержана. Даже в условиях опыта зависимости не отражают действительных соотношений при больших значениях $\sqrt{d}$ в области, где глубина размыва перестает зависеть от диаметра частиц. Зависимости дают неудовлетворительный результат для мелких грунтов. Нетрудно убедиться, что для $d<0{,}56$ *см* при $q=0$ рассмотренные зависимости дают положительную глубину размыва, что, очевидно, не может иметь места в действительности. По этой же причине нельзя согласиться с рекомендацией Н. Т. Смолянинова пользоваться его зависимостями для определения глубины размыва в слабосвязных грунтах, приняв $d=0$.

Сказанное позволяет полагать, что форма зависимостей, связывающих глубину потока в месте наибольшего размыва с удельными расходами, перепадом на сооружении и крупностью частиц, выбрана Н. Т. Смоляниновым не вполне удачно.

В 1932 г. Е. А. Замарин опубликовал свое предложение по методике расчета размыва дна за сооружениями. Это предложение было особенно отчетливо сформулировано в 1952 г. [7].

По Е. А. Замарину, глубину размыва можно приближенно найти по равенству

$$h=\frac{q}{U_R}; \qquad U_R=U_1\sqrt[n]{R},$$

где U_1 — допустимая скорость для грунта при гидравлическом радиусе $R=1$;

n — показатель степени.

Для песчаных, глинистых, лёссовых и гравийных грунтов при $R\leqslant 3$ *м* $n=2+R$, при $R>5$ *м* $n\approx 6$. Для галечных грунтов при $R\leqslant 2{,}0$ *м* $n=2{,}5+0{,}5\,R$, при $R\geqslant 5$ *м* $n=5$.

Е. А. Замарин рекомендует учитывать в расчетах снижение уровня воды за рисбермой в размере 10% от h.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Как будет показано в главе III, расчет по допускаемой скорости приемлем только для случаев подтопленного прыжка при условии полного гашения избыточной энергии в пределах водобоя и рисбермы. Только для такого режима и может быть рекомендован прием Е. А. Замарина. Величина U_1 для расчета местного размыва должна приниматься меньше неразмывающей скорости, определенной в равномерном потоке.

Размеры понижения уровня воды в нижнем бьефе зависят не только от подвижности грунта и величины удельных расходов, но тесно связаны также с уклоном реки ниже сооружения и сроком эксплуатации последнего. Поэтому понижение уровня не может быть задано одной цифрой и должно устанавливаться специальными расчетами.

Эту задачу решает И. И. Леви [8]. Рассматривая на основе баланса наносов развитие размыва по времени и по длине нижнего бьефа, И. И. Леви находит изменение продольного профиля дна и поверхности воды в реке ниже гидроузла за разные промежутки времени, протекшие от начала эксплуатации. Так как расчет ведется применительно к естественному профилю русла, то в расчете учитывается влияние бытового уклона реки.

В своих построениях И. И. Леви предполагает, что размыв в начальном створе русла за креплением остановится, когда скорость течения достигнет неразмывающих значений.

С. В. Избаш [9], считая, что в яме местного размыва должна гаситься вся избыточная энергия потока, не погашенная в пределах водобоя и рисбермы, предложил при определении глубины размыва исходить из величины этой избыточной энергии.

Потерю энергии в яме размыва С. В. Избаш полагает равной

$$\varepsilon_{\omega} = \Delta U_{\omega} \xi \sqrt{\omega_{\omega}} \zeta h_v .$$

Здесь Δ — вес единицы объема воды;

U_{ω} — средняя, характерная для вальца в данный момент скорость[1];

ξ — безразмерное число, характерное для вымоины данной формы, связанное со структурой донного вальца;

ω_{ω} — площадь вымоины; $\sqrt{\omega_{\omega}}$ — стандартный линейный размер вымоины;

ζ — коэффициент гидравлических сопротивлений в пределах вымоины;

h_v — скоростной напор.

---

[1] Средняя скорость равна нулю. Поэтому величину U_{ω} скорее можно рассматривать как коэффициент скоростной размерности.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Энергия, теряемая потоком в пределах ямы местного размыва, дается следующим выражением:

$$\varepsilon_\omega = \Delta M'_\omega q (E_e - E_r),$$

где M'_ω — безразмерная величина;

E_e — удельная энергия потока в конце рисбермы;

E_r — удельная энергия потока в русле реки за ямою размыва.

Величина $M'_\omega (E_e - E_r)$ принимается равной

$$M'_\omega (E_e - E_r) = \left(h_e + \frac{\alpha_e U_e^2}{2g}\right) - \left(h_r + \frac{\alpha_r U_r^2}{2g}\right).$$

Здесь h_e, α_e, U_e — глубина воды, корректирующий множитель и средняя скорость течения в конце рисбермы;

h_r, α_r, U_r — глубина воды, корректирующий множитель и средняя скорость течения за ямою размыва.

Приравнивая написанные выше равенства и полагая

$$h_e = h_r; \quad U_e = U_r,$$

$$h_u = \frac{U_r^2}{2g}; \quad \sqrt{\omega_\omega} \approx 2b,$$

$$\frac{M'_\omega}{\xi\zeta} = M_\omega,$$

где b — глубина размыва, С. В. Избаш приходит к следующему выражению:

$$b = \frac{M_\omega}{2} \frac{q}{U_\omega} (\alpha_e - \alpha_r).$$

В конце размыва, когда дно стабилизируется, U_ω условно приравнивается к скорости трогания для грунта нижнего бьефа.

Идея связать глубину местного размыва с избыточной энергией потока в конце рисбермы совершенно правильна, и при ее реализации могла бы быть решена задача для тех режимов нижнего бьефа, которые не охватываются формулами М. С. Вызго и Е. А. Замарина. Однако зависимость С. В. Избаша такого решения не дает из-за условности положений, принятых для определения потерь энергии в яме размыва, а также неопределенности коэффициентов, вошедших в зависимость.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Формула не была проверена на экспериментальном материале большого цикла опытов, проведенных С. В. Избашем [9] над местным размывом на лабораторной модели водосливной плотины, и по своей форме не вполне согласуется с данными этих опытов.

Ту же идею избыточной энергии использует в своей работе И. А. Тер-Аракелян [10]. В отличие от С. В. Избаша И. А. Тер-Аракелян просто принимает, что глубина местного размыва прямо пропорциональна избыточной энергии:

$$h = Kq(\alpha_1 U_1^2 - \alpha_2 U_2^2).$$

Здесь α_1 и U_1 — корректирующий множитель и средняя скорость течения в конце рисбермы;

α_2 и U_2 — корректирующий множитель и средняя скорость течения в русле реки за ямою размыва;

K — коэффициент пропорциональности.

Это равенство дано автором на основании умозрительных заключений, в силу чего достоверность равенства может быть установлена только после непосредственной проверки на опыте. Имеющиеся в работе И. А. Тер-Аракеляна чисто качественные сопоставления с данными экспериментов С. В. Избаша и сравнения с косвенными показателями опытов И. И. Тараймовича [11] не позволяют судить о правильности принятой формы функциональной зависимости.

Нужно иметь в виду, что экспериментальная проверка как формулы И. А. Тер-Аракеляна, так и С. В. Избаша осложнена затруднительностью измерения действительной величины корректирующего множителя, α_1, который, согласно вполне убедительным выводам Д. И. Кумина [12], должен устанавливаться не только по форме осредненной эпюры скоростей, но и с учетом пульсации последних. При современной технике эксперимента измерения пульсации скоростей в призме возможны, но требуют специальной аппаратуры, сложных опытов и очень громоздких вычислений.

Построения С. В. Избаша и И. А. Тер-Аракеляна нуждаются еще в одном замечании. При выводе обеих формул не учитывалось влияние осветленной воды в верхнем бьефе на глубину размыва и потому в некоторых случаях они могут привести к выводам, противоречащим действительному ходу явления. Так, например, по формуле С. В. Избаша для случая полного гашения избыточной энергии в пределах водобоя и рисбермы ($\alpha_1 = \alpha_2$) глубина размыва должна равняться нулю при любых прочих условиях. На самом же деле, когда в нижний бьеф поступает вода, освобожденная в водохранилище от наносов,

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

размыв дна за рисбермой будет происходить даже при полном успокоении потока, если скорость течения за креплением превышает неразмывающие значения для грунта нижнего бьефа.

Кроме рассмотренных выше предложений по расчету местного размыва дна в нижнем бьефе гидротехнических сооружений, имеется формула И. И. Тараймовича [13].

И. И. Тараймович дает «расчетную» формулу наибольшей глубины размыва в символической записи:

$$t_{\text{макс}} = f(g,\ z,\ \beta,\ h,\ p,\ \alpha_{\omega}),$$

где $t_{\text{макс}}$ — наибольшая глубина местного размыва;
q — удельный расход воды;
z — действующий напор;
β — степень открытия водосливного фронта (отношение длины действующего водосливного фронта к полной ширине нижнего бьефа);
h — глубина потока в нижнем бьефе;
p — коэффициент, учитывающий поперечные и продольные составляющие скоростей и угол падения струи;
α_{ω} — угол сбоя потока.

Выбор аргументов автор этой зависимости не обосновывает. Физический смысл некоторых аргументов, например коэффициента p, не ясен.

Хотя формула И. И. Тараймовича названа автором расчетной, она не может быть, однако, применена на практике, так как содержание символически записанной зависимости не раскрыто.

В итоге проведенного анализа необходимо отметить, что формулы, предложенные различными авторами, оказываются справедливыми для разных гидравлических режимов в зависимости от того, какие положения принимались за исходные при выводе формулы. Напомним, что формула М. С. Вызго отвечает размыву сжатой струей при отогнанном прыжке в случаях, когда после затопления струи скорость течения оказывается меньше неразмывающей скорости. Формула Е. А. Замарина применима для расчетов глубины размыва при полном гашении избыточной энергии на водобое и рисберме. Для ее практического использования необходимо знать неразмывающую скорость в условиях ямы размыва. Предложения С. В. Избаша и И. А. Тер-Аракеляна должны быть отнесены к случаям неполного гашения энергии при средних скоростях в конце крепления меньших неразмывающей скорости для нижнего бьефа.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Следует также отметить, что существующие расчетные приемы для определения глубины местного размыва, если не считать работы И. И. Тараймовича [13], относятся к плоскому потоку.

Приведенный обзор и анализ предложений различных авторов приводят к выводу, что дальнейшее уточнение этих предложений в целях выбора надлежащей методики расчета глубины местного размыва в нижних бьефах крупных гидроузлов возможно лишь при более глубоком изучении самого процесса размыва и порождающих его гидравлических явлений.

Глава II

ГИДРАВЛИКА ЯМЫ РАЗМЫВА

§ 1. Задачи гидравлического исследования

Течения в районе ямы местного размыва отличаются особенностями, обусловленными, во-первых, нарушением режима потока сооружениями и, во-вторых, специфической формой дна в месте размыва. Так как размеры и очертания ямы зависят от характера течений, то достаточно полное рассмотрение деформации дна за рисбермами плотин невозможно без освещения гидравлического режима потока в районе местного размыва.

Особенности течений проявляются как в общем движении потока ниже рисбермы, так и в режиме местных скоростей и их пульсаций.

Как указывалось в главе I, при изучении общего движения потока требует специального исследования увеличение удельных расходов в нижнем бьефе, возникающее в некоторых случаях при резком расширении сечения, сопровождающем переход потока из водосбросных сооружений в русло реки.

Как будет показано далее, при наличии ниже рисбермы ямы размыва увеличение удельных расходов воды над нею в пространственных условиях становится обязательным, а степень увеличения возрастает с глубиной размыва. Глубина же размыва, как известно, зависит от величины удельного расхода воды. Таким образом, оба процесса взаимно стимулируют друг друга.

Влияние ямы размыва на местные скорости проявляется главным образом при изменении глубины потока при сходе его с закрепленной рисбермы. При этом происходит перераспределение скоростей течения в вертикальной плоскости, отражающееся на энергетическом балансе потока.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Перераспределение скоростей по вертикали, сопровождающее переход потока в яму размыва, порождает усиленную турбулентную пульсацию скоростей. В результате этих изменений в придонной области потока создается своеобразный гидравлический режим; сопротивление частиц грунта действию этого режима значительно меньше, чем в обычных условиях.

§ 2. Изменение удельных расходов воды в нижнем бьефе сооружений

В пространственных условиях сопряжения бьефов удельные расходы воды на коротком, ближайшем к гидроузлу участке нижнего бьефа могут значительно отличаться от удельного расхода на водосливе и чаще всего превышают удельный расход в конце рисбермы.

Увеличение удельных расходов воды за водосборными сооружениями было обнаружено еще в тридцатых годах в ряде лабораторий Советского Союза при испытании пространственных моделей гидроузлов. Это явление наблюдали Р. С. Гальперин и А. Д. Халтурин в лабораториях МВД СССР, И. П. Липчевский [14] и И. И. Тараймович в лаборатории ВОДГЕО. Увеличение удельных расходов в нижнем бьефе отмечали позднее и другие советские научно-исследовательские учреждения.

Отклонение режима потока от условий плоского течения возникает в нижнем бьефе при сбросе воды относительно узким водосливным фронтом в широкое русло реки, при частичной работе водосливного фронта, а также при неравномерном распределении удельных расходов по длине водослива.

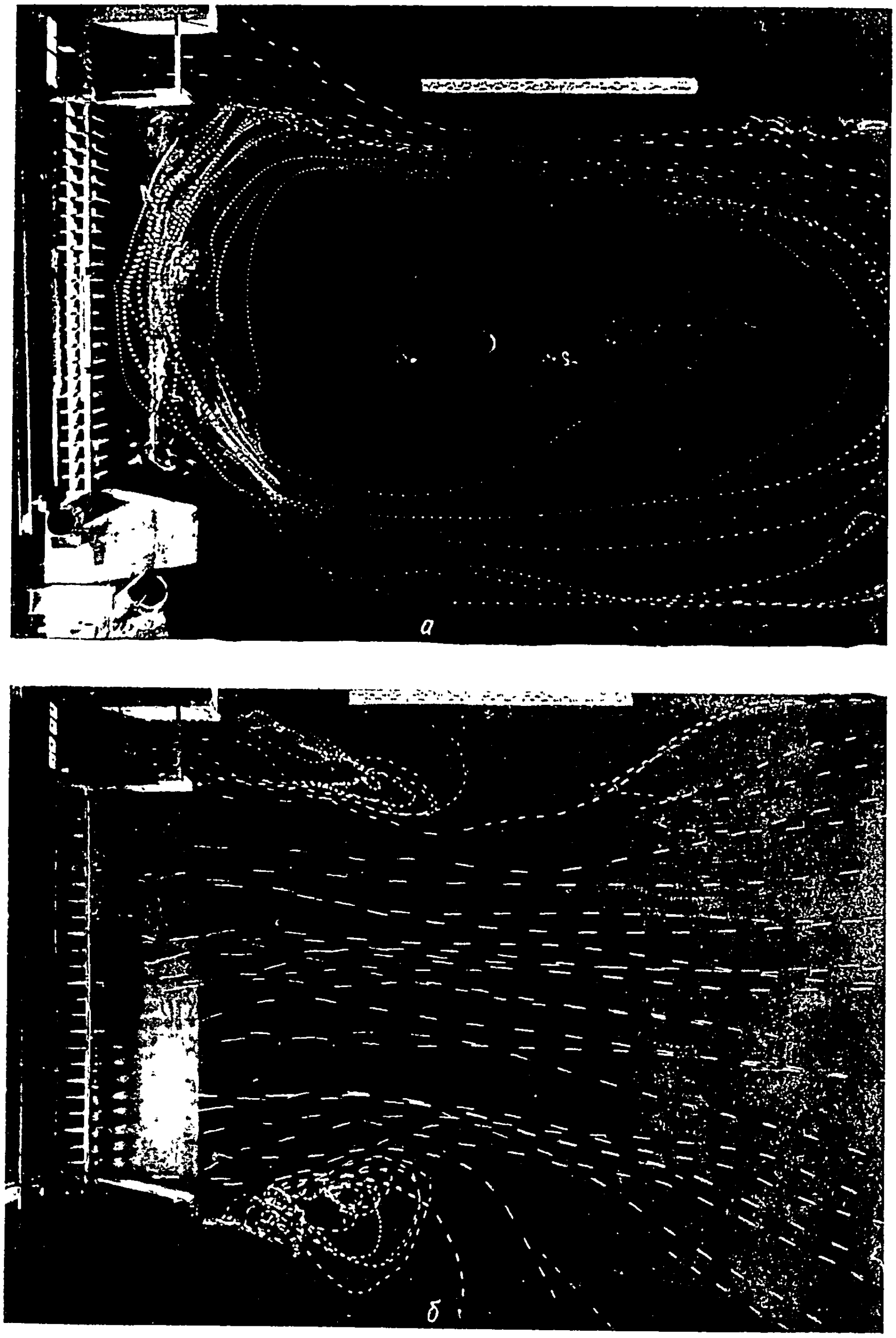
Рассмотрим сначала поведение потока при частичной работе водосливного фронта или в условиях, когда ширина нижнего бьефа превышает ширину водослива.

Пропуск воды частью водосливного фронта приводит к образованию в нижнем бьефе водоворотных зон, располагающихся по бокам транзитного потока. При определенных условиях эти водоворотные зоны как бы сжимают транзитную струю и заставляют ее сужаться. Примеры сжатия потока в нижнем бьефе лабораторной модели можно видеть на фиг. 2.

Как показали наши исследования, сужения или расширения транзитного потока происходят только там, где истечение узким фронтом в широкий бьеф (внезапное расширение границ потока) сочетается с изменением скоростей течения в вертикальной плоскости. Местами таких изменений являются, во-первых, область прыжка, внутри которой по мере продвижения воды в сторону нижнего бьефа происходит перераспределение скоростей по глубине потока, и, во-вторых, пункты рез-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2



Фиг. 2. Сжатие транзитной струи на модели Цимлянского гидроузла: *а* — работает гидростанция, плотина закрыта; *б* — плотина работает всем фронтом, гидростанция закрыта

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

кого увеличения (или уменьшения) глубины русла, т. е. места внезапного уменьшения (или увеличения) средней по глубине скорости течения.

Для проверки высказанных положений автором в лаборатории Московского инженерно-строительного института имени В. В. Куйбышева (МИСИ) были поставлены опыты над распределением скоростей течения и удельных расходов воды при внезапном расширении прямоугольного русла. Опыты проводились в лотке, узкая верхняя часть которого резко переходила в широкую нижнюю (фиг. 3). Ширина нижней части лотка во всех проведенных опытах равнялась 0,80 *м*. Узкий подходный участок в большинстве случаев был равен 0,50 *м*, а в некоторых опытах сокращался до 0,10 и 0,28 *м*.

Часть опытов производилась при одинаковой на обоих участках лотка глубине воды. В большей части опытов глубина узкого участка была меньше, чем глубина широкого участка. В некоторых случаях выпуск воды из узкой части в широкую осуществлялся из-под щита.

Результаты наблюдений помещены в табл. 3 и для нескольких типичных опытов показаны на фиг. 3, 4, 5 и 6. На фигурах сплошной линией показана граница между транзитной струей и водоворотной зоной. Граница устанавливалась так, чтобы вправо от нее в каждом сечении лотка отсекался транзитный расход воды, равный расходу подводящей, узкой части лотка, а влево от границы суммарный расход равнялся бы нулю, т. е. попутный расход воды водоворота в точности соответствовал бы обратному (вторичному) расходу.

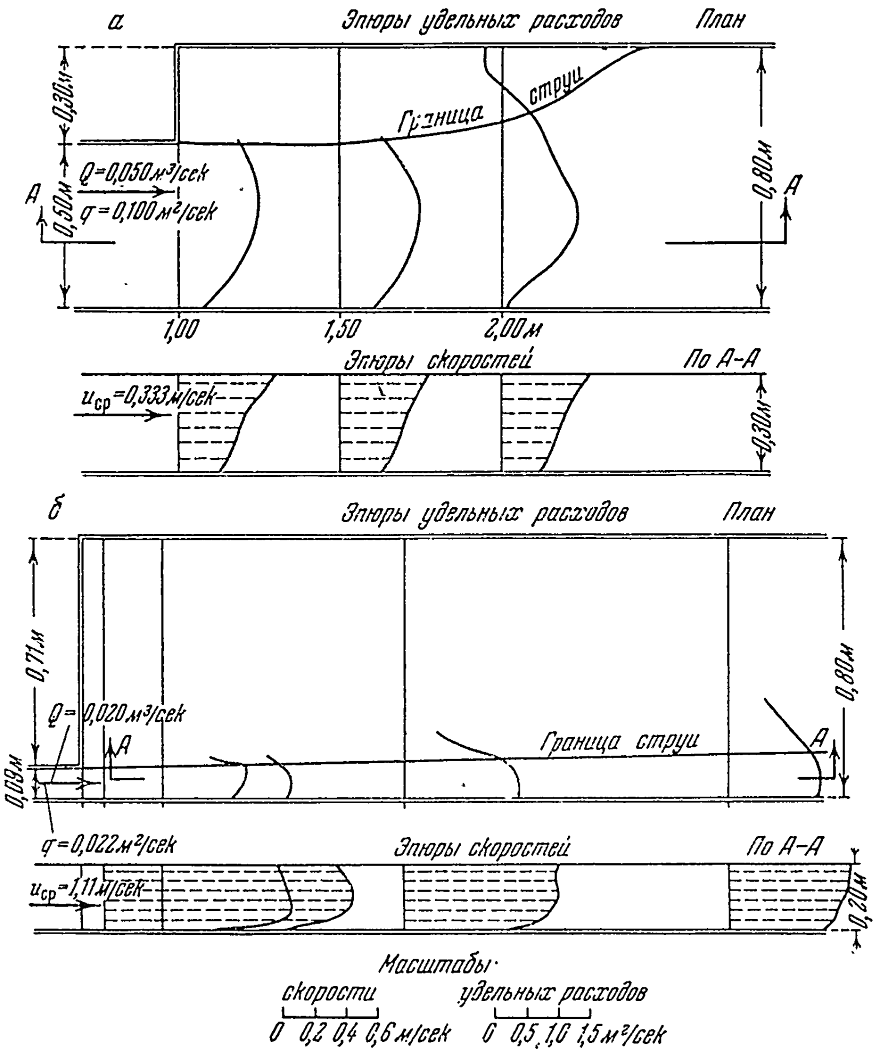
В табл. 3 помещены также данные некоторых опытов Н. В. Халтуриной [15], изучавшей влияние неравномерности распределения скоростей течения в плане на размыв дна за креплением модели плотины в лотке шириной 1,50 *м*.

Результаты опытов, проведенных в лаборатории МИСИ, показывают, что в тех случаях, когда глубина воды в узкой и широкой частях лотка одинакова, причем на границе их поток не поджимается щитом сверху, струя в широкой части лотка очень медленно растекается и увеличения удельного расхода не происходит (см. фиг. 3). Во всех остальных опытах, при которых глубина в широкой части превышала глубину подходного участка лотка (см. фиг. 4, 5 и данные табл. 3) или истечение воды происходило из-под щита (см. фиг. 6 и опыты № 2щ, 3щ и 7щ в табл. 3), транзитная струя сужается, причем средний удельный расход в ее пределах существенно больше удельного расхода в створе расширения лотка.

В опытах Н. В. Халтуриной при наличии уступа на дне лотка также фиксировалось резкое увеличение удельных расходов.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

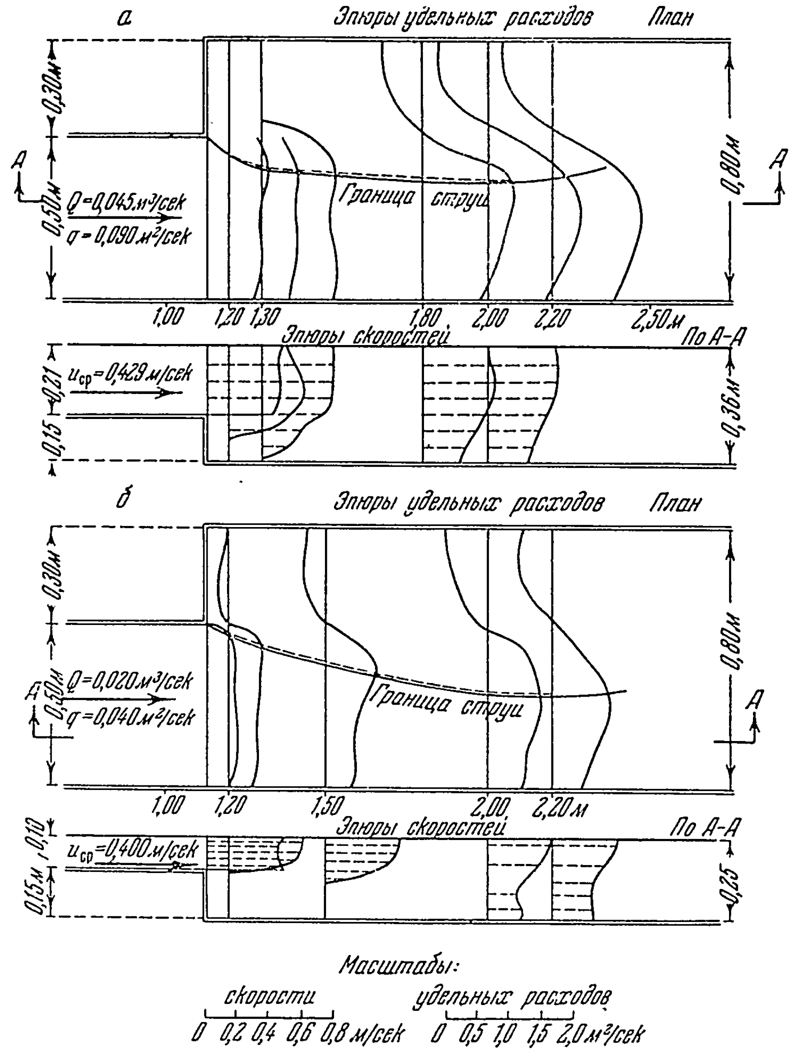


Фиг. 3. Растекание струи при резком расширении прямоугольного канала:

а — отношение ширин узкой и широкой частей канала $\frac{B_0}{B}=0{,}625$; *б* — отношение ширин узкой и широкой частей канала $\frac{B_0}{B}=0{,}112$

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2



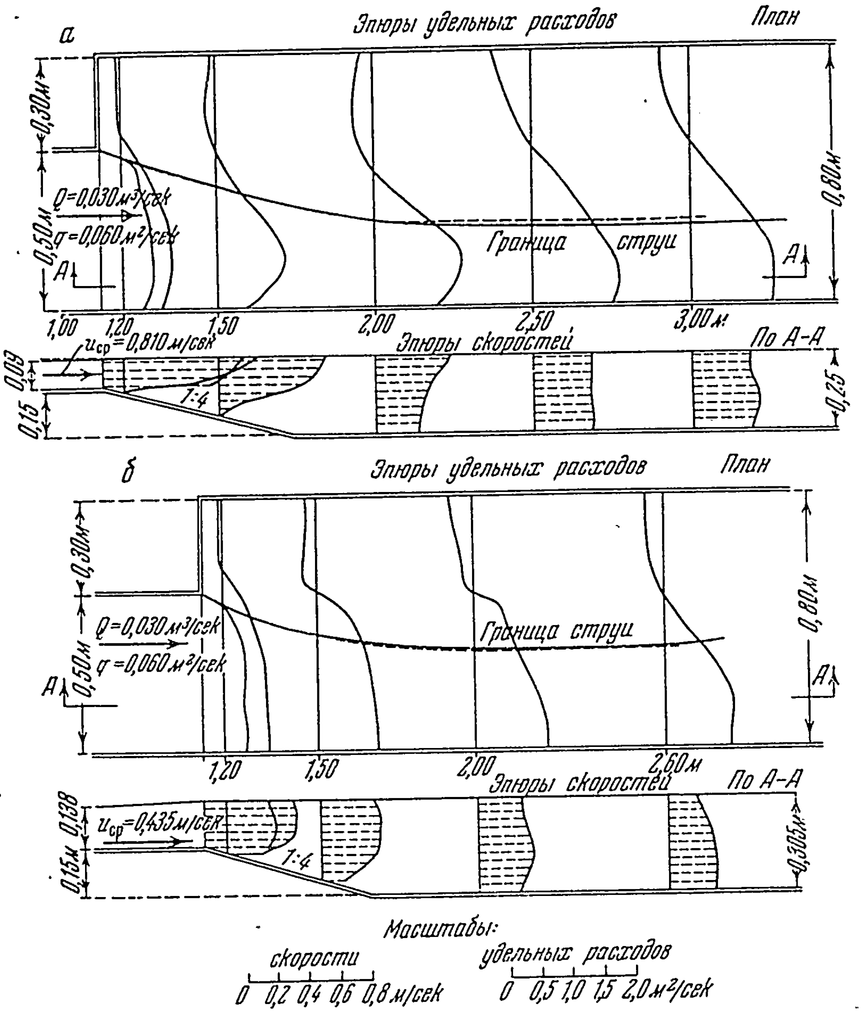
Фиг. 4. Сжатие струи при резком расширении и углублении канала. Дно на участках различной глубины сопрягается вертикальной стенкой:

а — отношение глубин широкой и узкой частей канала $\frac{h}{h_0} = 1{,}71$;

б — отношение глубин широкой и узкой частей канала $\frac{h}{h_0} = 2{,}50$

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

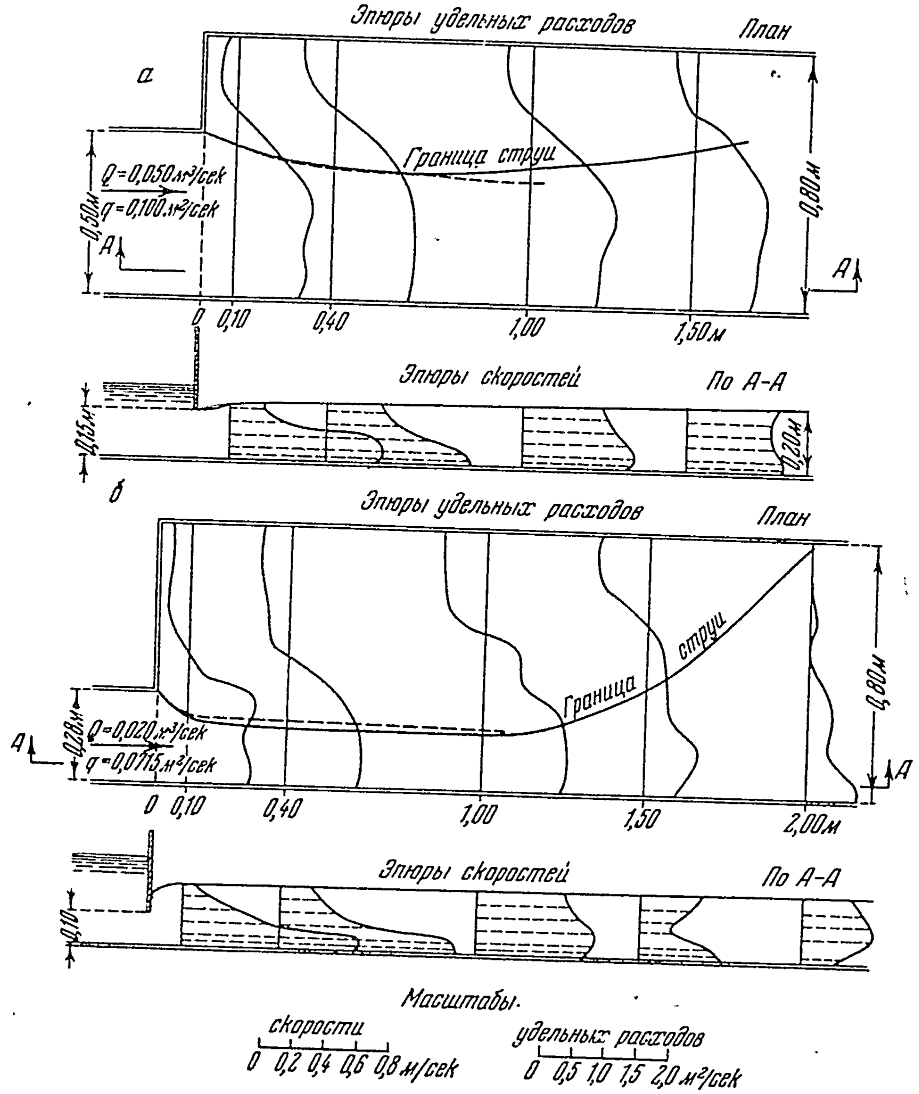


Фиг. 5. Сжатие струи при резком расширении и углублении канала

а — отношение глубин широкой и узкой частей канала $\frac{h}{h_0}=2{,}28$, $U_0=0{,}810$ *м³/сек*; *б* — отношение глубин широкой и узкой частей канала $\frac{h}{h_0}=2{,}20$, $U_0=0{,}435$ *м³/сек*

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2



Фиг. 6. Сжатие струи при истечении из-под щита в широкий нижний бьеф:

а — отношение ширин узкой и широкой частей канала $\frac{B_0}{B} = 0{,}625$; *б* — отношение ширин узкой и широкой частей канала $\frac{b_0}{B} = 0{,}350$

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Таблица 3

№ опыта	Расход воды Q, $м^3/сек$	Ширина лотка: в узкой части B_0, $м$	Ширина лотка: в широкой части B, $м$	Глубина лотка: в узкой части h_0, $м$	Глубина лотка: в широкой части h, $м$	α_0	α_x	Характер сопряжения глубины	Минимальная ширина транзитного потока в широкой части лотка: B, $м$ по опыту	Минимальная ширина транзитного потока в широкой части лотка: B, $м$ по расчету	$\frac{B_0}{B_1}=\frac{q}{q_0}$ по опыту	$\frac{B_0}{B_1}=\frac{q}{q_0}$ по расчету
Опыты, проведенные в лаборатории МИСИ им. В. В. Куйбышева												
1	0,050	0,50	0,80	0,300	0,300	1,06	1,04		0,495		1,01	
2	0 020	0,09	0,80	0,200	0,200	1,00	1,03		0,115		0,782	
4	0,040	0,50	0,80	0,202	0,356	1,02	1,085	Порог	0,375	0,386	1,135	1,295
4[I]	0045	0,50	0,80	0,210	0,360	1,05	0,012	»	0,360	0,370	1,390	1,350
5[I]	0040	0,50	0,80	0,190	0,350	1,04	1,08	Откос	0,375	0,370	1,335	1,350
11	0,020	0,50	0,80	0,100	0,246	1,00	1,00	Порог	0,290	0,290	1,725	1,725
11[I]	0,020	0,50	0,80	0,100	0,250	1,065	1,025	Откос	0,245	0,272	2,040	1,840
15	0,030	0,50	0,80	0,140	0,300	1,00	1,05	Порог	0,310	0,333	1,610	1,500
15[I]	0,030	0,50	0,80	0,140	0,300	1,06	1,04	Откос	0,320	0,312	1,575	1,590
18[I]	0,030	0,50	0,80	0,090	0,250	1,025	1,03	»	0,250	0,260	2,00	1,930
18[II]	0,030	0,50	0,80	0,086	0,211	1,02	1,145	»	0,300	0,317	1,665	1,580
2щ	0,050	0,50	0,80	0,147	0,190	1,68	1,12	Истечение из-под щита. Отверстие 0,01 м	0,345	0,348	1,450	1,435*
3щ	0,020	0,28	0,80	0,190	0,193	1,225	1,105	То же	0,180	0,194	1,550	1,440
7щ	0,050	0,50	0,80	0,180	0,180	1,520	1,135	Истечение из-под щита. Отверстие 0,15 м	0,400	0,410	1,250	0,220

* α_0 относится к створу, расположенному на 0,10 м ниже щита.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2
Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Продолжение табли цы 3

№ опыта	Расход воды Q, $м^3/сек$	Ширина лотка		Глубина лотка		a_0	a_x	Характер сопряжения глубины	Минимальная ширина транзитного потока в широкой части лотка		$\frac{B_0}{B_1} = \frac{q}{q_0}$	$\frac{B_0}{B_1} = \frac{q}{q_0}$
		в узкой части B_0, м	в широкой части B, м	в узкой части h_0, м	в широкой части h, м				B_0, м по опыту	B, м по расчету	по опыту	по расчету
						Опыты, проведенные в лаборатории Гидропроекта						
10	0,040	0,75	1,50	0,104	0,253	1,045	1,06	Порог	0,445	0,403	1,685	1,860
13	0,040	1,00	1,50	0,101	0,225	1,040	1,14	Откос	0,710	0,638	1,410	1,570
15	0,090	1,21	1,50	0,090	0,250	1,225	1,81	Порог	1,06	0,970	1,140	1,850
16	0,020	0,75	1,50	0,050	0,205	1,030	1,15	Порог	0,470	0,274	1,595	2,740
18	0,040	0,72	1,50	0,102	0,259	1,050	1,12	Откос	0 445	0,390	1,620	1,845
19	0,020	0,75	1,50	0,054	0,211	1,010	1,105	Откос	0,470	0,280	1,595	2,680

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Таким образом, экспериментальные данные подтвердили высказанное выше положение о том, что сжатие транзитной струи при истечении в широкий бьеф происходит только там, где внезапное расширение плановых границ потока сопровождается перераспределением скоростей течения в вертикальной плоскости. Причина рассматриваемого явления заключается в своеобразии условий равновесия потока при наличии застойных пазух (водоворотных зон).

При резком изменении скоростей течения в воде развиваются значительные силы инерции, которые на единицу объема жидкости в среднем по живому сечению потока выражаются величиной

$$\frac{\gamma}{2g}\frac{d}{dx}(\alpha U^2),$$

где γ — объемный вес жидкости;
g — ускорение силы тяжести;
x — текущая координата, направленная по течению потока;
α — корректирующий множитель, отражающий неравномерность распределения скорости по сечению;
U — средняя скорость течения.

В пределах короткого участка силы трения пренебрежимо малы, поэтому силы инерции уравновешиваются главным образом действием продольного уклона водной поверхности γi, т. е.

$$\frac{\gamma}{2g}\frac{d}{dx}(\alpha U^2)=\gamma i$$

или в конечных приращениях

$$\frac{\gamma}{2g}(\alpha_2 U_2^2-\alpha_1 U_1^2)=\gamma i L;$$

в этом случае α_1, α_2 — корректирующие множители и U_1, U_2 — средние скорости течения в двух смежных сечениях, отстоящих друг от друга на расстояние L.

Как уже отмечалось, трение не оказывает на поток существенного влияния, так как явления, связанные с внезапным расширением русла, протекают на сравнительно коротком участке. В малой значимости трения можно убедиться по степени растекания потока при неизменной глубине (см. фиг. 3).

В потоке, в котором транзитная струя занимает все сечение и водоворотные зоны отсутствуют, силы инерции тесно связаны с формой русла и при постоянном расходе воды пол-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

ностью определяются изменением живых сечений — $\frac{d}{dx}\left(\frac{\alpha}{F^2}\right)$, поскольку

$$\frac{\gamma}{2g}\frac{d}{dx}(\alpha U^2)=\frac{\gamma}{2g}\frac{d}{dx}\left(\alpha\frac{Q^2}{F^2}\right).$$

Уклоны же водной поверхности ничем не ограничиваются и могут устанавливаться любыми, в соответствии с действующими в потоке силами. Поэтому равновесие ограниченного берегами потока достигается только за счет возникновения уклона, необходимого для уравновешивания сил инерции.

В резко расширяющемся потоке, в котором транзитная струя ограничивается не непосредственно берегами, а водоворотными зонами, условия несколько отличаются от рассмотренных. Не будучи ограничена с одной или с обеих сторон берегами, транзитная струя в пределах широкого бьефа может свободно изменять свою ширину. Вместе с этим получают возможность изменяться и силы инерции; связь их с сечениями русла нарушается. Напротив, поверхность транзитной струи оказывается связанной с уровнем застойных пазух и не может приобретать уклон изолированно от поверхности последних. В соответствии с этим, в отличие от ограниченного берегами потока, равновесие в пространственном случае достигается уже не только за счет уклона зеркала воды, находящегося в зависимости от водоворотных зон, но и за счет изменения сил инерции, регулируемых сужением или расширением транзитной струи.

Влияние водоворотных зон на поверхность транзитного потока заключается в уменьшении, как бы сглаживании ее продольного уклона. Отвечая на это, транзитная струя принимает такую ширину, при которой силы инерции уменьшаются. Если последние направлены против течения, т. е. когда $\alpha_2U_2^2 > \alpha_1U_1^2$ и в широкой части бьефа имеется прямой уклон водного зеркала, то струя расширяется; если же силы инерции направлены по движению воды ($\alpha_2U_2^2 < \alpha_1U_1^2$) и в бьефе устанавливается обратный уклон, то транзитная струя, как правило, сжимается. Этот факт и служит причиной увеличения удельных расходов воды.

Количественные соотношения между степенью увеличения удельных расходов воды и характеристиками потока определяются ниже для того же простейшего случая внезапного расширения прямоугольного русла (фиг. 7).

Обозначим через B_0h_0 и U_0 ширину, глубину и среднюю скорость течения на подходном участке; через B и h — ширину и среднюю глубину широкой части потока; через B_x и U_x — ширину и среднюю скорость течения транзитной струи в расчет-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

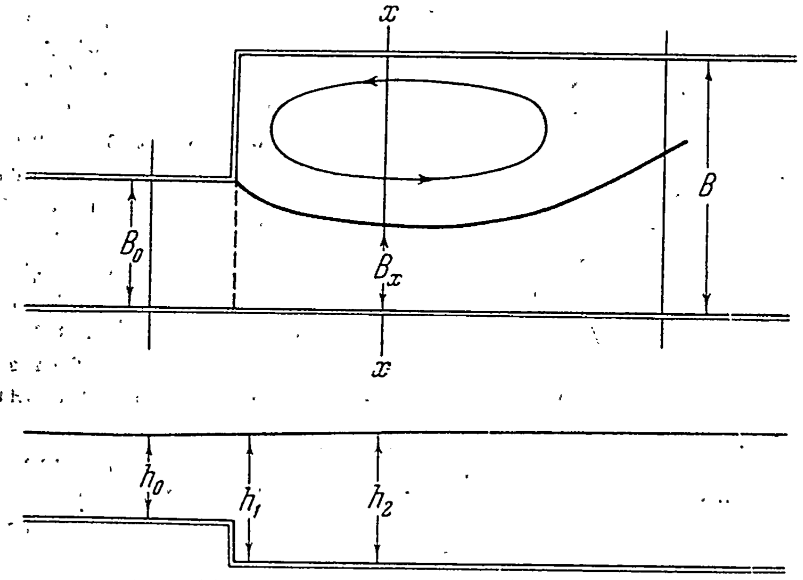
ном сечении $x—x$; через h_1 — глубину потока в начале широкой части русла и h_2 — глубину в расчетном створе.

Примем следующие допущения:

а) силы трения о дно и стенки русла не оказывают существенного влияния на режим транзитной струи и могут быть исключены из анализа;

б) давление в потоке подчиняется гидростатическому закону;

в) по всей ширине русла устанавливается одинаковый продольный уклон водной поверхности (поперечные уклоны отсутствуют);



Фиг. 7. Схема прямоугольного русла с резким расширением и углублением дна

г) изменение живых сечений широкой части русла, являющееся следствием негоризонтальности водной поверхности, пренебрежимо мало и может не учитываться.

При первых трех допущениях справедливы следующие два уравнения количеств движения, составленные для участка потока от места расширения до расчетного створа ($X—X$). Первое из уравнений отвечает изменению количества движения в транзитной струе с учетом давления воды на боковую грань и силы трения между транзитной струей и водоворотной зоной, второе — изменению количества движения во всем бьефе, включая и водоворотные области.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

$$\left.\begin{aligned}\frac{\gamma}{g} Q (\alpha_x U_x - \alpha_0 U_0) - P = \gamma \Big[B_0 \frac{h_1^2}{2} - B_x \frac{h_2^2}{2} - \\ - \frac{1}{3} (B_0 - B_x) \left(\frac{h_1^2}{2} + \frac{h_2^2}{2} + \frac{h_1 h_2}{2} \right) \Big], \\ \frac{\gamma}{g} Q (K_x - \alpha_0 U_0) = \gamma B \left(\frac{h_1^2}{2} - \frac{h_2^2}{2} \right).\end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

В этих равенствах Q означает расход воды, P — сила трения между транзитной струей и водоворотной областью, $\frac{\gamma}{g} Q K_x$ — количество движения по всей ширине расчетного створа ($X - X$), включая и водоворотные области, α_0 и α_x — корректирующие множители, соответственно, для подходного участка и для расчетного створа.

$$\alpha_0 = \frac{\frac{1}{f_0} \int_0^f \bar{u}_{f_0}^2 df_0}{U_0^2}; \qquad \alpha_x = \frac{\frac{1}{f_x} \int_0^f \bar{u}_{f_x}^2 df_x}{U_x^2}.$$

Здесь f_0 — площадь живого сечения на подходном участке;
f_x — площадь сечения транзитной струи;
$\bar{u}_{f_0}$ и $\bar{u}_{f_x}$ — скорости в точке, являющиеся функциями координат точек соответствующих сечений;
U_0 и U_x — как и выше, средние скорости в соответствующих сечениях.

Согласно последнему допущению (пункт г),

$$\frac{1}{6} (h_1^2 + h_2^2 + h_1 h_2) \approx \frac{1}{4} (h_1^2 + h_2^2).$$

Тогда вместо уравнений (1) можно написать:

$$\frac{\gamma}{g} Q (\alpha_x U_x - \alpha_0 U_0) - P = \gamma \frac{B_x + B_0}{2} \cdot \frac{h_1 + h_2}{2} (h_1 - h_2),$$

$$\frac{\gamma}{g} Q (K_x - \alpha_0 U_0) = \gamma B \frac{h_1 + h_2}{2} (h_1 - h_2).$$

Деля уравнения друг на друга и производя преобразования, получим

$$\frac{\alpha_x U_x - \alpha_0 U_0}{K_x - \alpha_0 U_0 - \dfrac{2BP}{\frac{\gamma}{g} Q (B_x + B_0)}} = \frac{B_0 + B_x}{2B}. \qquad (2)$$

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

На коротком участке сжатия струи, где силы трения не оказывают существенного влияния, разность $K_x - \dfrac{2BP}{\dfrac{\gamma}{g}(B_x + B_0)}$ может быть принята равной $\alpha_x U_0 \dfrac{h_0}{h}$. Это допущение подтверждается приведенными выше экспериментальными данными.

Производя соответствующую замену в равенстве (2), придем к выражению:

$$\frac{\alpha_x U_x - \alpha_0 U_0}{\alpha_x U_0 \dfrac{h_0}{h} - \alpha_0 U_0} = \frac{B_0 + B_x}{2B}.$$

Учитывая, что

$$\frac{B_0 + B_x}{2B} = \frac{B_0}{2B} + \frac{B_0 B_x}{2BB_0} = \frac{B_0}{2B}\left(1 + \frac{U_0 h_0}{U_x h}\right),$$

представим предшествующее равенство в виде

$$\alpha_x U_x - \alpha_0 U_0 = \left(\alpha_x U_0 \frac{h_0}{h} - \alpha_0 U_0\right)\left(1 + \frac{U_0 h_0}{U_x h}\right)\frac{B_0}{2B}$$

или

$$\left(\frac{U_x}{U_0} - \frac{\alpha_0}{\alpha_x}\right)\frac{U_x h}{U_0 h_0} = \frac{B_0}{2B}\left(\frac{h_0}{h} - \frac{\alpha_0}{\alpha_x}\right)\left(\frac{U_x h}{U_0 h_0} + 1\right).$$

После переноса всех членов в правую часть уравнения и простейших преобразований получим квадратное уравнение относительно $\dfrac{U_x}{U_0}$:

$$\frac{U_x^2}{U_0^2} - \left[\frac{\alpha_0}{\alpha_x} + \frac{1}{2}\frac{B_0}{B}\left(\frac{h_0}{h} - \frac{\alpha_0}{\alpha_x}\right)\right]\frac{U_x}{U^0} - \frac{1}{2}\frac{B_0 h_0}{Bh}\left(\frac{h_0}{h} - \frac{\alpha_0}{\alpha_x}\right) = 0. \quad (3)$$

Решение этого уравнения дает

$$\frac{U_x}{U_0} = \frac{1}{2}\left[\frac{\alpha_0}{\alpha_x} + \frac{1}{2}\frac{B_0}{B}\left(\frac{h_0}{h} - \frac{\alpha_0}{\alpha_x}\right)\right] +$$

$$+ \sqrt{\frac{1}{4}\frac{\alpha_0^2}{\alpha_x^2} + \frac{1}{2}\frac{B_0}{B}\left(\frac{h_0}{h} - \frac{\alpha_0}{\alpha_x}\right)\left[\frac{1}{8}\frac{B_0}{B}\left(\frac{h_0}{h} - \frac{\alpha_0}{\alpha_x}\right) + \frac{1}{2}\frac{\alpha_0}{\alpha_x} + \frac{h_0}{h}\right]}. \quad (4)$$

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Подставляя в равенство (4) вместо U_x и U_0 равные им величины $\frac{q_x}{h}$ и $\frac{q_0}{h_0}$, получим соотношение между удельным расходом транзитной струи в широком бьефе и удельным расходом в месте истечения:

$$\frac{q_x}{q_0}=\frac{1}{2}\frac{\alpha_0 h}{\alpha_x h_0}+\frac{1}{4}\frac{B_0}{B}\left(1-\frac{\alpha_0 h}{\alpha_x h_0}\right)+$$

$$+\sqrt{\frac{1}{4}\frac{\alpha_0^2 h^2}{\alpha_x^2 h_0^2}+\frac{1}{2}\frac{B_0}{B}\left(1-\frac{\alpha_0 h}{\alpha_x h_0}\right)\left[\frac{1}{8}\frac{B_0}{B}\left(1-\frac{\alpha_0 h}{\alpha_x h_0}\right)+\frac{1}{2}\frac{\alpha_0 h}{\alpha_x h_0}+1\right]}. \quad (5)$$

Графически это уравнение представлено на фиг. 8 в виде пучка кривых, изображающих связь $\frac{q_x}{q_0}=f\left(\frac{\alpha_0 h}{\alpha_x h_0}\right)$ для различных отношений $\frac{B_0}{B}$.

Рассмотрим крайние условия.

1. Если в (4) и (5) положить $\alpha_x=\alpha_0$ и $h=h_0$, что имеет место в потоках, не испытывающих изменения скоростей в вертикальной плоскости, то при любых значениях $\frac{B_0}{B}$ справедливы следующие соотношения:

$$U_x=U_0 \text{ и } q_x=q_0.$$

Эти соотношения указывают на отсутствие сжатия или расширения струи, что согласуется с положением, высказанным в начале параграфа, и с результатами опытов, представленных на фиг. 3.

2. В случае безграничной ширины нижнего бьефа, $B=\infty$ и, соответственно, $\frac{B_0}{B}=0$, согласно равенству (4),

$$U_x=\frac{\alpha_0}{\alpha_x}U_0.$$

Отсюда вытекает, что изменение скорости течения транзитной струи в безграничном бьефе не зависит от изменения глубин и связано только с изменением коэффициента α. В частном случае, когда $\frac{\alpha_0}{\alpha_x}\doteq 1$, $U_x=U_0$.

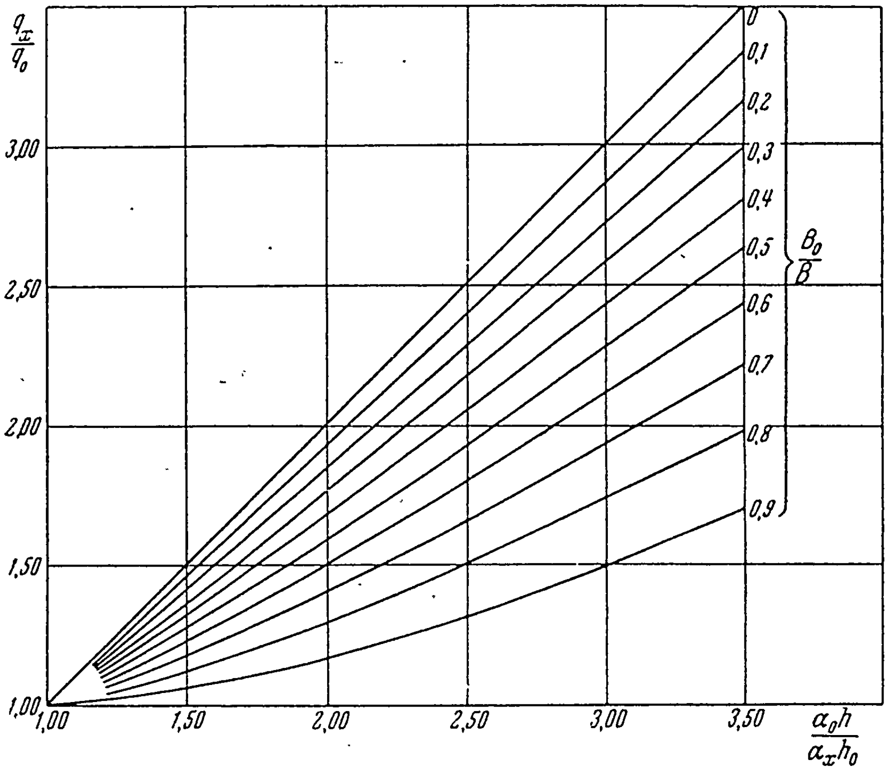
Этот результат показывает, что при $\alpha_0=\alpha_x$ и очень широком нижнем бьефе скорость в транзитной струе остается

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

равной скорости подхода независимо от степени изменения глубин. Соответственно, удельный расход увеличивается или уменьшается пропорционально глубине:

$$\frac{q_x}{q_0} = \frac{h_x}{h_0}.$$



Фиг. 8. График для определения увеличения удельных расходов при резком расширении русла

3. В тех случаях, когда расширение русла отсутствует и $\frac{B_0}{B} = 1$, равенства (4) и (5) дают

$$\frac{U_x}{U_0} = \frac{h_0}{h} \text{ или } q = q_0, \tag{6}$$

т. е. удовлетворяется условие неразрывности.

Анализ уравнений (4) и (5), а также данные лабораторных исследований показывают, что при применении этих

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

уравнений к практическим расчетам не следует выходить за пределы соотношения $\frac{\alpha_0 h}{\alpha h_0} \leqslant 3$.

Получить более простые уравнения, связывающие расходы воды выше и ниже внезапного расширения русла, можно путем замены правой части уравнения (1) приближенной величиной

$$\frac{B_0 + B_x}{2} h (h_1 - h) \approx B_0 h (h_1 - h).$$

Тогда уравнение (2) представится в виде

$$\frac{\alpha_x U_x - \alpha_0 U_0}{K_x - \alpha_0 U_0} = \frac{B_0}{B}$$

и, рассуждая так же как и раньше, вместо (4) и (5) получим:

$$\frac{U_x}{U_0} = \frac{\alpha_0}{\alpha_x} + \frac{B_0}{B}\left(\frac{h_0}{h} - \frac{\alpha_0}{\alpha_x}\right) \qquad (4')$$

и

$$\frac{q_x}{q_0} = \frac{\alpha_0 h}{\alpha_x h_0} + \frac{B_0}{B}\left(1 - \frac{\alpha_0 h}{\alpha_x h_0}\right). \qquad (5')$$

Равенства (4′) и (5′) отличаются простотой, но дают несколько преуменьшенные величины сжатия или расширения.

При проверке полученных соотношений был произведен расчет границ транзитной струи для экспериментального потока. Сопоставление рассчитанной границы с наблюдавшейся показано на фиг. 4, 5 и 6. Сплошной линией показана граница по данным измерения, пунктирной — полученная по расчету. Как нетрудно убедиться, расчет дает близкие к опыту результаты (см. также табл. 3).

Равенства (4) и (5), а также (4′) и (5′) приведены для простого случая внезапного расширения русла прямоугольного сечения. Однако вследствие того, что эти равенства включают корректирующие множители α_0 и α_x, они справедливы для любого распределения скоростей; поэтому ими можно пользоваться для расчета более сложных случаев: для расчета удельных расходов воды в нижних бьефах водосливных плотин, при истечении жидкости из-под щита и при других типах водосбросных сооружений, но только при затопленном режиме нижнего бьефа и прямоугольном русле. Последнее условие в практиче-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

ских условиях не всегда выполняется. Поэтому, пользуясь равенствами (4), (5), (4′) и (5′) для инженерных расчетов, приходится, где это нужно, приводить естественные формы русла к прямоугольному сечению. Операция осреднения обычно упрощается тем, что очень часто дно реки непосредственно выше крепления выравнивается под одну отметку.

Для расчетов изменения удельных расходов по (5) и (5′) нужно знать величины α_0 и α_x. Эти множители устанавливаются обычно по эпюрам распределения скоростей течения по глубине потока; распределение скоростей в первом приближении может быть найдено при помощи построений, изложенных в § 3. Д. И. Кумин [12] показал, что для турбулентных потоков коэффициенты α зависят не только от распределения скоростей по глубине потока, но и от пульсации скоростей. Учет этого фактора при количественных решениях в настоящее время не может быть выполнен из-за отсутствия приемов расчета пульсационных скоростей.

Для задачи, рассматриваемой в настоящем параграфе, отказ от учета пульсаций при вычислении корректирующих множителей не вносит больших погрешностей, так как в равенства (5) и (5′) входят не самые величины α_0 и α_x, а их отношения. Отношения же в области малого влияния сил трения в меньшей степени зависят от пульсации скоростей. Для примера укажем, что в опытах, представленных на фиг. 11, 12 и 17, ошибка определения $\frac{\alpha_0}{\alpha_x}$ для вертикалей 6 без учета пульсаций составляет соответственно 1, 10 и 10%.

Приведенные цифры в соответствии с имеющимися измерениями пульсационных скоростей получены для плоских потоков. В пространственных условиях ошибка при определении отношений $\frac{\alpha_0}{\alpha_x}$ для транзитной струи должна быть несколько меньше. Сделанный вывод вытекает из того факта, что наличие боковых водоворотов способствует сокращению вальцевых областей над струею.

В месте максимального сжатия транзитной струи величина α_0 в большинстве случаев устанавливается приблизительно равной 1,05 — 1,10.

В частном случае, когда поток на подходе имеет нормальное распределение скоростей по глубине, для определения удельного расхода в месте наибольшего сжатия струи можно принимать отношение $\frac{\alpha_0}{\alpha_x} \approx 0{,}95 - 1{,}00$. (Имеется в виду, что на подходном участке величина $\alpha_0 \approx 1{,}05$).

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Соответственно, для створов максимального сжатия уравнения (5) и (5′) несколько упрощается:

$$\frac{q_x}{q_0} = \frac{1}{2}\frac{h}{h_0} + \frac{1}{4}\frac{B_0}{B}\left(1 - \frac{h}{h_0}\right) +$$

$$+ \sqrt{\frac{1}{4}\frac{h^2}{h_0^2} + \frac{1}{2}\frac{B_0}{B}\left(1 - \frac{h}{h_0}\right)\left[\frac{1}{8}\frac{B_0}{B}\left(1 - \frac{h}{h_0}\right) + \frac{1}{2}\frac{h}{h_0} + 1\right]} \quad (7)$$

и

$$\frac{q_x}{q_0} = \frac{h}{h_0} + \frac{B_0}{B}\left(1 - \frac{h}{h_0}\right). \quad (7')$$

Как указывалось выше, увеличение удельных расходов по сравнению со сбросными расходами должно наблюдаться не только тогда, когда водослив работает неполным сбросным фронтом, но и при неравномерном в его пределах распределении удельных расходов; например, когда часть пролетов открыта полностью, а часть не на полную высоту.

В этом случае в нижнем бьефе возможны два различных режима. При относительно малой разнице в удельных расходах воды, сбрасываемой в отдельных частях водосливного фронта, поток, хотя и течет с разными скоростями, но заполняет всю ширину бьефа: водоворотные области при этом отсутствуют. Большая разница в удельных расходах может повлечь за собою отрыв потока от берега со стороны струи, несущей меньшие удельные расходы, или разрыв по границе струй с разными расходами.

При безотрывном режиме решение задачи об увеличении удельных расходов требует подхода, несколько отличного от рассмотренного выше при исследовании истечения в широкий нижний бьеф.

Увеличение удельных расходов при неравномерном сбросе и безотрывном течении наблюдается в струе, имеющей большие удельные расходы. Причина этого явления заключается в том, что силы инерции в различных частях потока неодинаковы, уклон же водной поверхности, действие которого должно уравновешивать силы инерции, нивелируется по ширине потока общностью нижнего бьефа. В результате нивелировки уклонов происходит перераспределение скоростей течения, выравнивающее силы инерции по ширине бьефа.

Степень увеличения расходов для этого случая можно найти из следующих соображений.

Если пренебречь искривлениями струй, возникающими при перераспределении скоростей течения в нижнем бьефе, то в первом приближении допустимо считать, что уклон по всей ширине нижнего бьефа одинаков.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Отсутствие боковых вальцов позволяет для простоты вывода приложить к отдельным частям потока уравнение Бернулли. Это не внесет больших погрешностей в итоги построений, если рассматривать задачу применительно к сбегу потока с рисбермы.

При равенстве уклонов по ширине бьефа справедливо следующее соотношение:

$$\alpha_0' U_0^2 - \alpha' U^2 = \alpha_{01}^1 U_{01}^2 - \alpha_1' U_1^2. \qquad (8)$$

В этом равенстве α_0', U_0 — корректирующий коэффициент и скорость течения на начальном створе против пролетов, открытых полностью;

α_{01}', U_{01} — то же, но против пролетов, открытых частично;

α', U и α_1', U_1 — соответствующие им значения на расчетном створе.

Заменим в выражении (8) U_1 отношением $\frac{Q}{h_1 B_1}$, в котором Q означает расход, идущий через все частично открытые пролеты, а h_1 и B_1 — отвечающие ему глубина и ширина на расчетном створе. Тогда, решая (8) относительно U, получим

$$U = \sqrt{\frac{\alpha_0' U_0^2 - \alpha_{01}' U_{01}^2 + \alpha_1' \frac{Q^2}{h_1^2 B_1^2}}{\alpha'}}. \qquad (9)$$

Равенство (9) решается подбором путем последовательного назначения величины B_1.

Для определения степени увеличения удельных расходов при отрыве струи в нижнем бьефе следует пользоваться выведенными ранее равенствами (5), (5'), (7), (7'). Расчет при этом ведется так: расход воды, сбрасываемой через частично открытые пролеты, делится на удельный расход пролетов, открытых полностью. Ширина полученной таким образом условной струи прибавляется к ширине фронта, работающего с полным открытием щитов. Эта сумма в выражениях (5), (5), (7) и (7) принимается за B_0. Далее расчет ведется так же, как и в случае работы сооружения неполным фронтом.

§ 3. Распределение скоростей течения по глубине потока в яме местного размыва

Распределение скоростей течения по длине и глубине ямы местного размыва зависит, во-первых, от степени гашения энергии потока в пределах закрепленной части русла и, во-вторых,

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

от очертания ямы. В случае полного гашения избыточной энергии на рисберме поток подходит к месту размыва с нормальной эпюрой скоростей, свойственной равномерному движению воды. При неполном гашении скорости на подходе может иметься или поверхностный, или донный режим.

Распределение скоростей для трех перечисленных случаев показано на фиг. 9, 10, 11, 12 и 13.

Как нетрудно видеть, основное отличие в распределении скоростей при поверхностном и донном режимах от скоростей при успокоенном потоке заключается главным образом в размерах вальца, возникающего в придонной области потока над верховым откосом ямы. В первом случае, когда поток сбегает не полностью успокоенным, над верховым откосом устанавливается относительно мощный валец (фиг. 9, 11, 12 и 13); во втором случае, при нормальном распределении скорости, валец не образуется вовсе или охватывает очень небольшую по длине и глубине зону потока (см. фиг. 9 и 10).

Распределения скоростей, представленные на фиг. 9—13, получены при опытах над размывом дна за моделью водосливной плотины в плоском лотке. Длина закрепленной части русла во всех опытах была одинакова; различные формы эпюр на сбеге достигались дополнительными устройствами в пределах водобоя — решетками, порогами или щитами. Расход воды и глубина на рисберме одинаковы для всех опытов.

Каково бы ни было распределение скоростей в конце рисбермы, валец всегда заканчивается на участке наибольшего размыва, который служит границей раздела между обратными и прямыми скоростями в придонной области. Соответственно этому, в наиболее размытой части дна осредненная придонная скорость течения всегда близка к нулю. К поверхности воды скорости возрастают почти пропорционально расстоянию от дна.

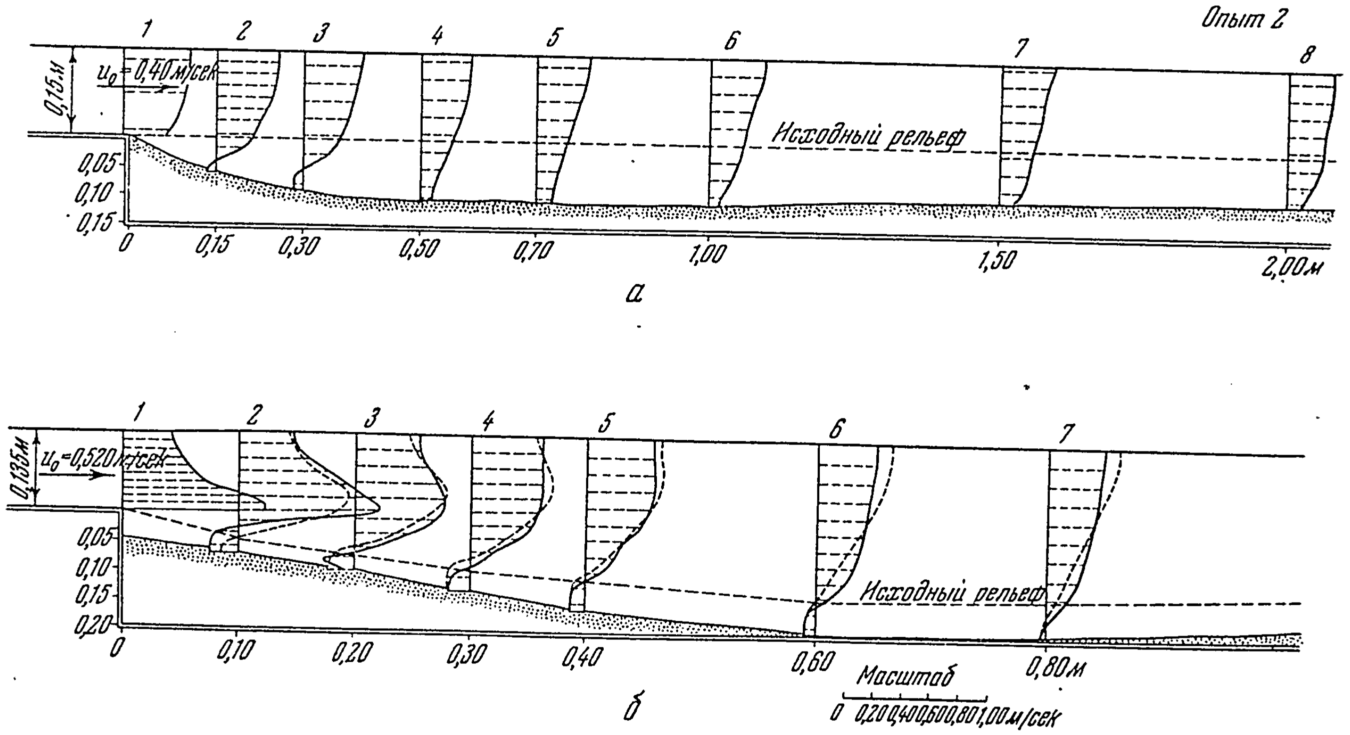
Следует отметить, что за местом наибольшего размыва эпюры скоростей, построенные в относительных величинах $\frac{u}{U_{ср}} = f\left(\frac{y}{h}\right)$, совпадают друг с другом в опытах как с нормальным, так и с аномальным распределением скоростей (фиг. 14).

Ниже створа наибольшего размыва осредненные скорости по всей глубине потока приобретают положительные значения и, постепенно выравниваясь, получают нормальное для речных условий распределение по слоям потока. Характер и степень выравнивания зависят от очертания низового откоса ямы размыва.

Для оценок глубины размыва, а также для определения корректирующих множителей, входящих в равенства, которые

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

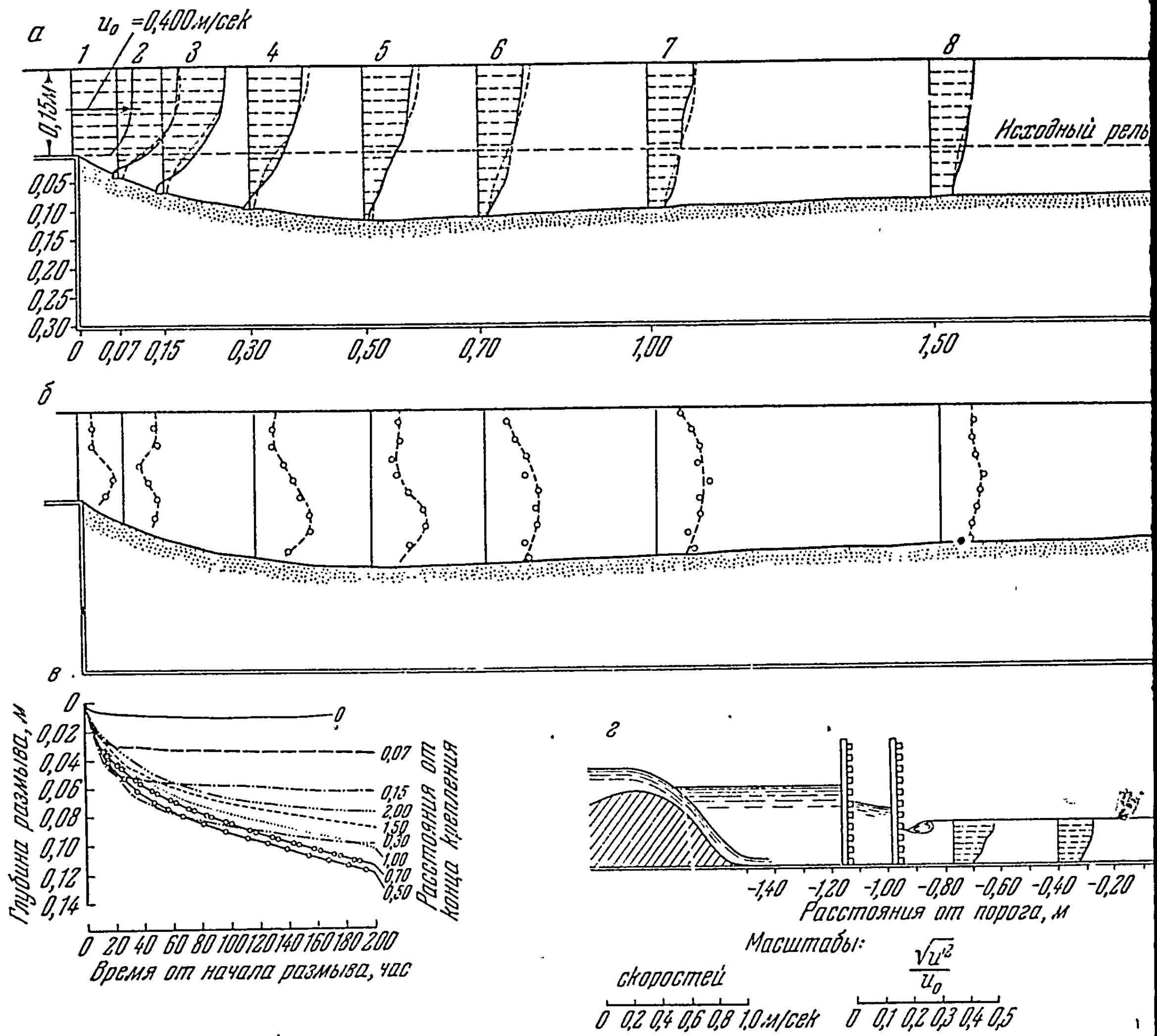


Фиг. 9. Размыв дна за водобоем:

а — опыт 2 в плоском лотке шириной B=1,5 *м*; Q=0,090 *м³/сек* при нормальном распределении скоростей в конце крепления; *б* — опыт при донном режиме; B=0,30 *м*; Q=0,021 *м³/сек*. ——— измеренные скорости; — — — — рассчитанные скорости

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

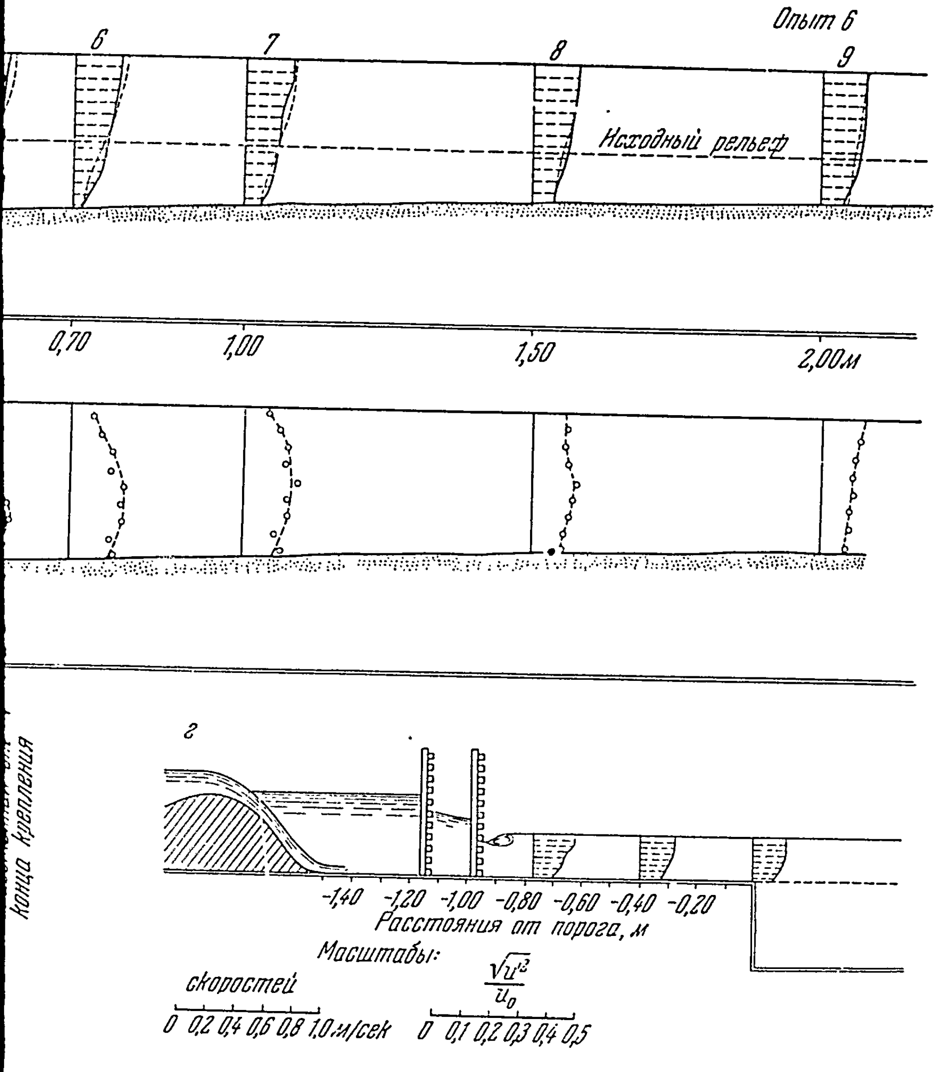


Фиг. 10. Размыв дна за водобоем при нормальном распределении скоростей в конце креп[…] в плоском лотке шириной 1,5 *м*; Q=0,090 *м³/сек*:

а — профиль размыва и осредненные скорости; —— —измеренные скорости — — — —рассчитанные скоро[…] ние среднеквадратических продольных пульсаций к средней скорости в конце водобоя $\frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{U_0}$; *в* — ход ра[…] установки.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

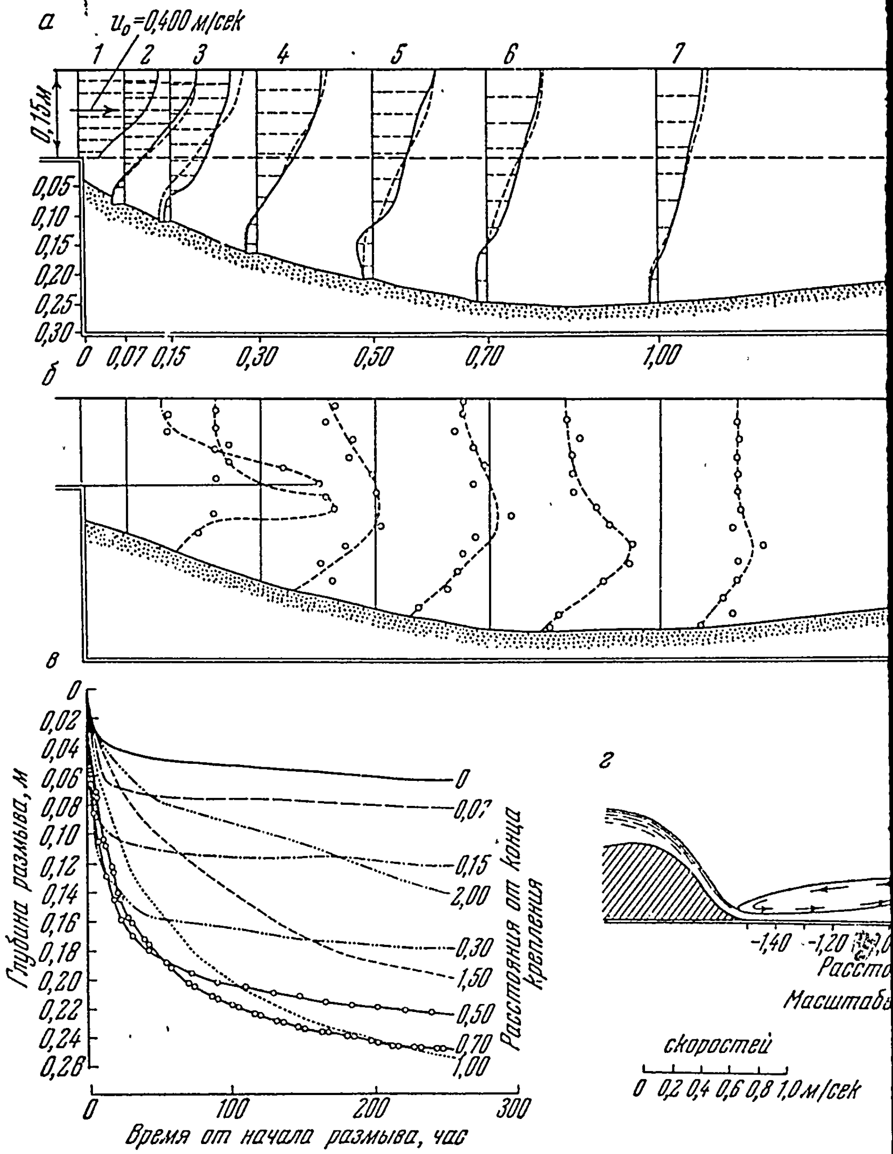


при нормальном распределении скоростей в конце крепления. Опыт 6 ком лотке шириной 1,5 *м*; Q=0,090 $м^3/сек$:

рости; —— —измеренные скорости — — — —рассчитанные скорости; *б* — отноше- ульсаций к средней скорости в конце водобоя $\frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{U_0}$; *в* — ход размыва; *г* — схема установки.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

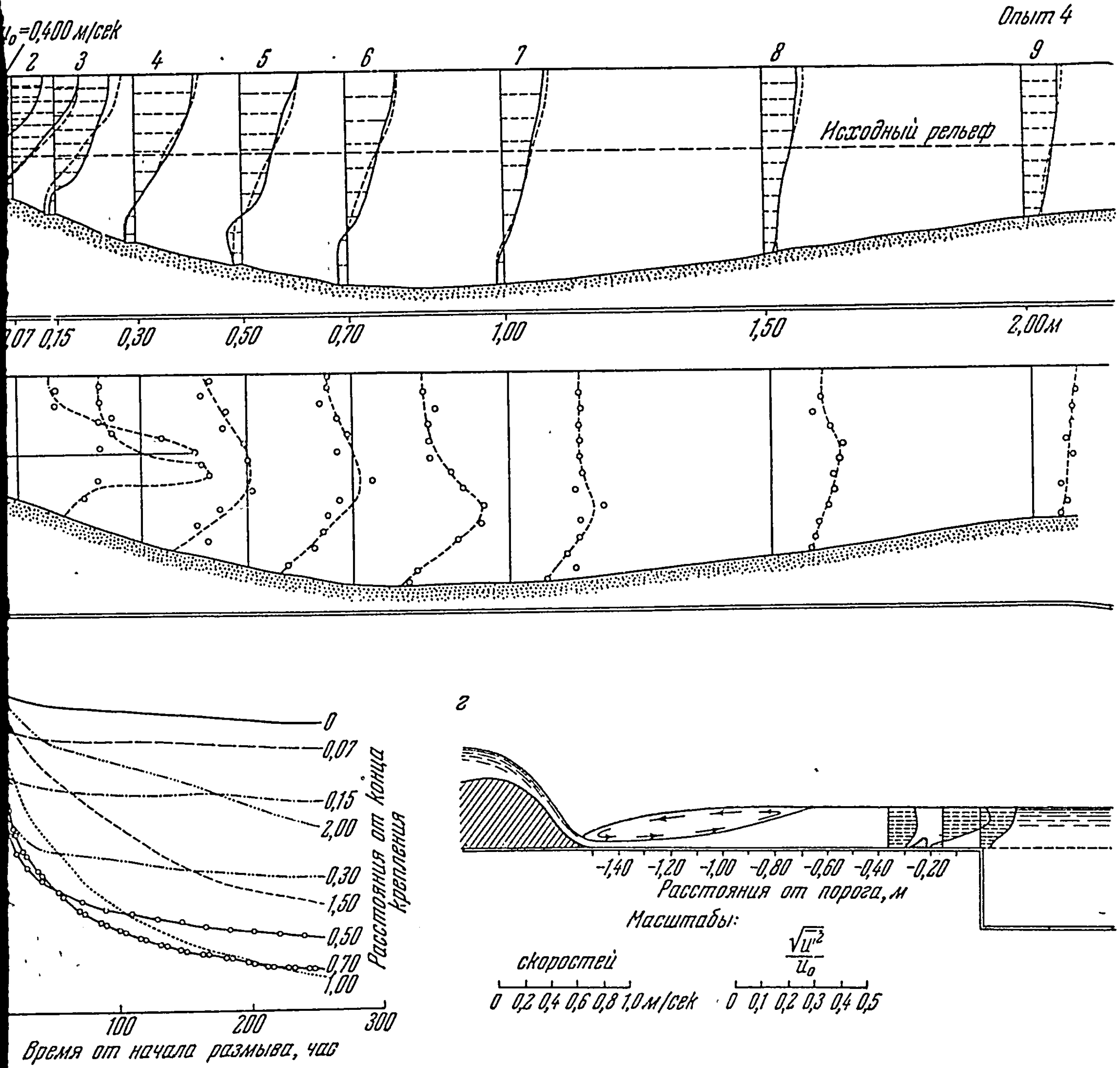


Фиг 11. Размыв дна за водобоем при поверхностном режиме скоро[…]
в плоском лотке шириной 1,5 *м*; Q=0,090 […]

а — профиль размыва и осредненные скорости; — — — измеренные скорости; […]
б — отношение среднеквадратических продольных пульсаций к средней скорост[…]
мыва; *г* — схема установки.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

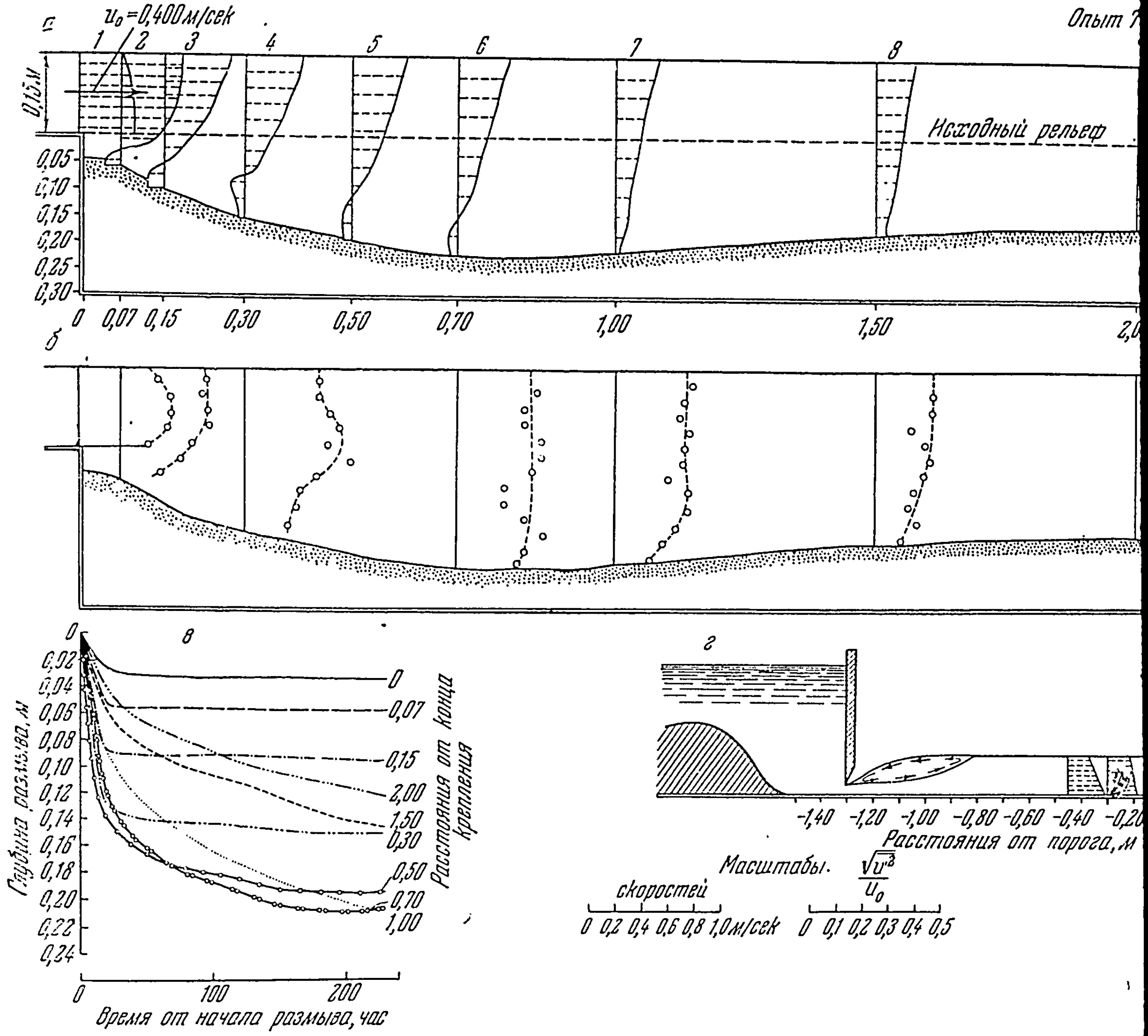


1. Размыв дна за водобоем при поверхностном режиме скоростей в конце крепления. Опыт 4 в плоском лотке шириной 1,5 м; Q=0,090 м³/сек:

...филь размыва и осредненные скорости; ——— измеренные скорости; — — — — — рассчитанные скорости; ...нение среднеквадратических продольных пульсаций к средней скорости в конце водобоя $\frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{U_0}$; *в* — ход размыва; *г* — схема установки.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

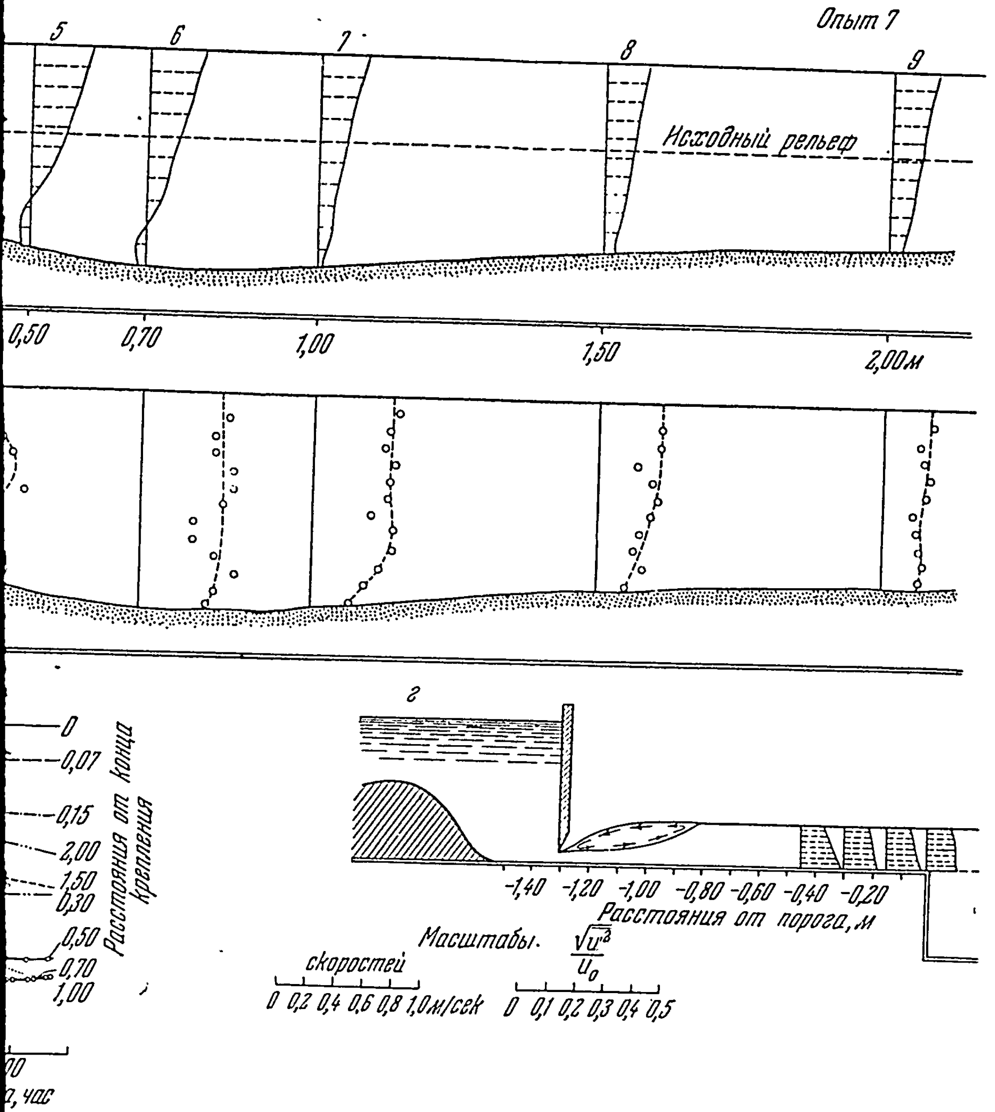


Фиг. 12. Размыв дна за водобоем при донном режиме скоростей в конце крепления. Опыт 7 в лотке шириной 1,5 *м*; Q=0,090 *м*³/*сек*:

а — профиль размыва и измеренные осредненные скорости; *б* — отношение среднеквадратических продольных к средней скорости в конце водобоя $\frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{U_0}$; *в* — ход размыва; *г* — схема установки

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

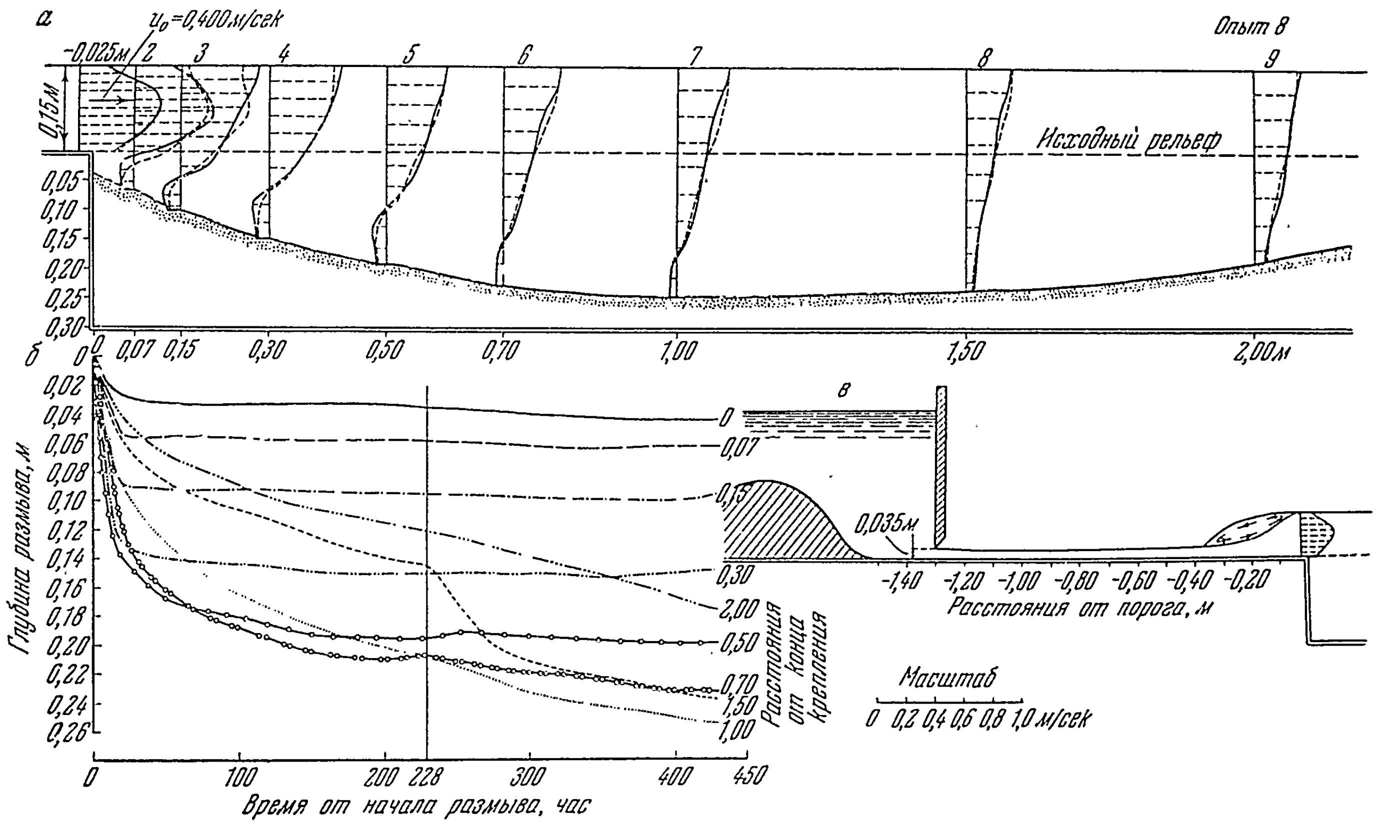


добоем при донном режиме скоростей в конце крепления. Опыт 7 в плоском лотке шириной 1,5 *м*; Q=0,090 *м*³/*сек*:

енные осредненные скорости; *б* — отношение среднеквадратических продольных пульсаций скорости в конце водобоя $\frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{U_0}$; *в* — ход размыва; *г* — схема установки

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2



Фиг. 13. Размыв дна за водобоем при донном режиме скоростей в конце крепления. Опыт 8 в плоском лотке шириной 1,5 *м*; Q=0,090 *м*^{3}/*сек*:

а — профиль размыва и осредненные скорости; ——— измеренные скорости; — — — — рассчитанные скорости; *б* — ход размыва; *в* — схема установки

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

были получены в § 1, возникает необходимость в расчете распределения скоростей в пределах размытой части русла. Задача эта весьма сложна, и приближенное решение ее разработано нами лишь для плоского потока.

В качестве исходных возьмем уравнения Рейнольдса, представляющие собой осреднение основных гидродинамических уравнений, написанных применительно к турбулентному движению [16].

Для плоского потока уравнения Рейнольдса с учетом силы тяжести:

$$\left.\begin{aligned}\rho\frac{\partial\bar{u}}{\partial t}&=-\left\{\frac{\partial}{\partial x}\left(\overline{P}_{xx}+\rho\bar{u}\bar{u}+\rho\overline{u'u'}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\overline{P}_{yx}+\rho\bar{u}\bar{v}+\right.\right.\\&\qquad\left.\left.+\rho\overline{u'v'}\right)\right\},\\ \rho g+\rho\frac{\partial\bar{v}}{\partial t}&=-\left\{\frac{\partial}{\partial x}\left(\overline{P}_{xy}+\rho\bar{v}\bar{u}+\rho\overline{u'v'}\right)+\right.\\&\qquad\left.+\frac{\partial}{\partial y}\left(\overline{P}_{yy}+\rho\bar{v}\bar{v}+\rho\overline{v'v'}\right)\right\}.\end{aligned}\right\}\qquad(10)$$

Здесь ρ — плотность воды;

x, y, t — текущие координаты плоскости и времени; ось x направлена горизонтально по течению потока; ось y направлена вертикально вверх;

$P_{xx}, \overline{P}_{xy}$ — нормальное и касательное напряжения на единицу площади, действующие в плоскости нормальной оси x;

$\overline{P}_{yx}, \overline{P}_{yy}$ — касательное и нормальное напряжения на единицу площади, действующие в плоскости нормальной оси y;

$\bar{u}, \bar{v}$ — горизонтальная и вертикальная составляющие осредненной скорости;

u', v' — горизонтальные и вертикальные пульсационные составляющие скорости.

Ниже рассматривается только случай установившегося движения, для которого

$$\rho\frac{\partial\bar{u}}{\partial t}=\rho\frac{\partial\bar{v}}{\partial t}=0.$$

В построениях не учитывается влияние вязкого трения, т. е. считается, что

$$\frac{\partial\overline{P}_{yx}}{\partial y}=\frac{\partial\overline{P}_{xy}}{\partial x}=0.$$

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Принимается, что давление внутри жидкости подчиняется гидростатическому закону, т. е.

$$\rho g + \frac{\partial}{\partial y}\overline{P}_{yy} = 0.$$

Допустим далее, что вертикальные составляющие осредненной скорости v малы и могут быть исключены из рассмотрения. При этом

$$\frac{\partial}{\partial y}\rho\overline{u}\overline{v} = \frac{\partial}{\partial x}\rho\overline{v}\overline{u} = \frac{\partial}{\partial y}\overline{v}\overline{v} = 0.$$

Опустим также инерционные члены, вызванные изменением средних квадратических величин пульсационных скоростей:

$$\frac{\partial}{\partial x}\rho\overline{u'u'} = \frac{\partial}{\partial y}\rho\overline{v'v'} = 0.$$

Тогда, заменяя $\frac{\partial}{\partial x}\overline{P}_{xx}$ через γi, вместо первого уравнения равенства (10) будем иметь

$$\rho\frac{\partial\overline{u}^2}{\partial x} + \rho\frac{\partial\overline{u'v'}}{\partial y} + \gamma i = 0. \qquad (11)$$

Второе уравнение даст

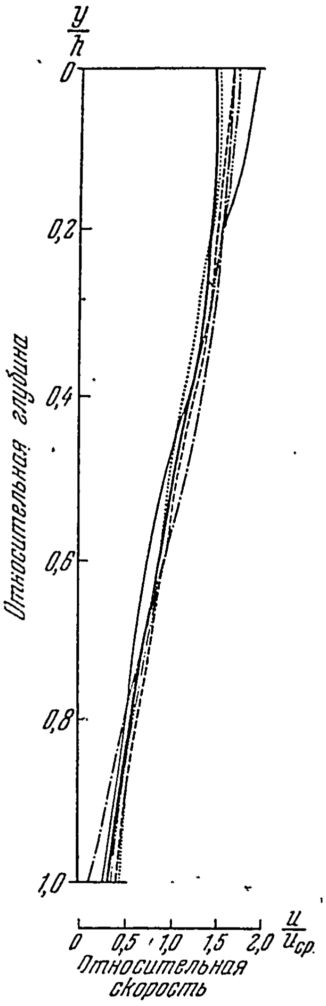
$$\rho\frac{\partial\overline{u'v'}}{\partial x} = 0. \qquad (12)$$

В современной гидродинамике величина $\rho\overline{u'v'}$ трактуется как турбулентное трение и обозначается τ.

Вводя это обозначение в предшествующее равенство, можно написать

$$\rho\frac{\partial\overline{u}^2}{\partial x} - \frac{\partial\tau}{\partial y} + \gamma i = 0. \qquad (13)$$

Первый член уравнения представляет собою силу инерции, возникающую при изменении осредненных скоростей вдоль потока и отнесенную к единице объема, второй член выражает сумму горизонтальных сил сопротивления, приложенных к единице объема и третий член — изменение давления вдоль потока, также отнесенного к единице объема.



Фиг. 14. Распределение скоростей по глубине потока за местом наибольшего размыва в относительных величинах: ———— опыт 2; — · — · — опыт 3; — — — опыт 4; ··· — ··· — ·· опыт 6; — ·· — ·· — опыт 7; ———— опыт 8

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Для решения уравнения относительно $\bar{u}$ необходимо прежде всего связать силы турбулентного трения с другими величинами, входящими в уравнение. Разыскание такой связи относится к еще не решенным задачам физики, и в настоящее время относительно интересующей нас зависимости имеются лишь более или менее удовлетворительные гипотезы.

Уравнение может быть решено без больших осложнений, если величину трения задать в форме, принимаемой В. М. Маккавеевым в его последних работах.

Согласно выводам В. М. Маккавеева, величина турбулентного трения может быть представлена в виде

$$\tau = \rho A \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial y} = 2\rho A \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}, \qquad (14)$$

где A — коэффициент с размерностью длины.

Соотношение (14) не отличается строгостью: применение его к условиям равномерного потока дает эллиптическое распределение скоростей по глубине, что противоречит опыту, показывающему логарифмический закон распределения. Однако существенное отклонение от опыта имеет место лишь в небольшой по толщине придонной области потока, точное описание скоростей в которой не является необходимым для рассматриваемой здесь задачи.

Чтобы показать приемлемость равенства (14) для освещения распределения скоростей течения в ямах местного размыва, на фиг. 15 приводятся сопоставления распределения по глубине потока величин: $\bar{u}\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}$, входящей в равенство (14), $\frac{\overline{u'v'}}{u_0^2}$, пропорциональной величине $\rho\overline{u'v'}$ в равенстве (11), и $y^2\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}\right)^2$, являющейся переменной частью выражения для трения по Л. Прандтлю (см. ниже). Сопоставление проведено для трех характерных эпюр осредненных скоростей, заимствованных из опытов Б. А. Фидмана над потоком с внезапным изменением его глубины [25]. Для этих опытов Б. А. Фидманом определялись величины $\overline{u'v'}$ и опубликованы отношения $\frac{\overline{u'v'}}{U_0^2}$, где U_0 — средняя скорость течения потока на подходе к месту углубления потока.

Трение, по Л. Прандтлю [17], выражается равенством

$$\tau = -\rho\overline{u'v'} = \rho l^2 \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}\right)^2, \qquad (15)$$

где l — коэффициент линейной размерности, именуемый «путем перемешивания».

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Применение этой зависимости к решению задач, близких по характеру к рассматриваемой, приводит к вполне удовлетворительным результатам *.

Для потоков, ограниченных стенками, Л. Прандтль полагает, что $l \approx \varkappa y$ ($\varkappa$ — постоянная Кармана). При этом выражение (15) получает вид

$$\tau = \varkappa^2 \rho y^2 \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}\right)^2. \qquad (16)$$

Рассмотрение фиг. 15 позволяет заметить общий характер изменения по глубине потока сравниваемых величин, что свидетельствует о их качественной близости. Количественного сближения можно добиться надлежащим выбором коэффициента A.

Коэффициент A не является постоянным и должен зависеть от гидравлических элементов потока. По соображениям размерности он связывается с линейным параметром. В дальнейших построениях для простоты решения будем считать его зависящим только от полной глубины потока. Даже при таком простейшем предположении интегрирование дифференциального уравнения (13) может быть выполнено лишь для потоков с неизменной глубиной, для которых $A = \text{const}$.

Подставляя (14) в уравнение (13), получим исходное дифференциальное уравнение

$$\rho \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} - \rho A \frac{\partial^2 \bar{u}^2}{\partial y^2} + \gamma i = 0$$

или

$$-A \frac{\partial^2 \bar{u}^2}{\partial y^2} + \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + gi = 0. \qquad (17)$$

В частном случае, когда $i = 0$, уравнение (17) приводится к уравнению В. М. Маккавеева **. Так как частное решение не может удовлетворить поставленной здесь задаче, автором предпринята попытка общего решения уравнения (17).

Имея в виду, что уклон водной поверхности меняется только по длине потока, введем обозначение $gi = f(x)$ и подставим его в (17). Тогда

$$-A \frac{\partial^2 \bar{u}^2}{\partial y^2} + \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + f(x) = 0. \qquad (18)$$

---

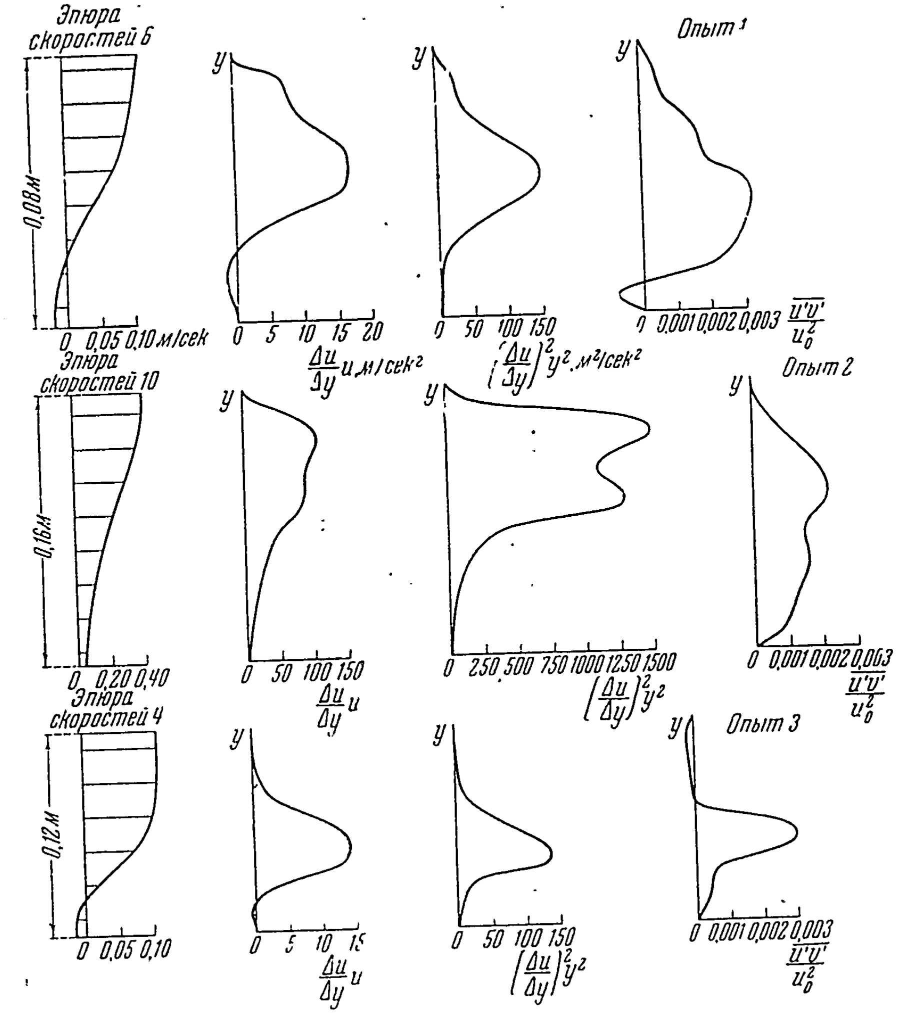
* См., например, Г. Н. Абрамович. Турбулентные свободные струи жидкостей и газов.

** Уравнение В. М. Маккавеева помещено в работе И. М. Коновалова [18].

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Если пренебречь трением по верхней и нижней границам потока, что вполне приемлемо для рассматриваемой задачи, то граничные условия для решения равенства (18) запишутся так:



Фиг. 15. Сопоставление распределения по глубине величин: $\frac{\Delta u}{\Delta y}u$ и $\left(\frac{\Delta\bar{u}}{\Delta y}\right)^2 y^2\ \frac{\overline{u'v'}}{U_0^2}$ и для эпюр скоростей различной формы

$$\left(\frac{\partial\bar{u}}{\partial y}\right)_{y=H}=\left(\frac{\partial\bar{u}}{\partial y}\right)_{y=0}=0, \qquad (19)$$

где H — полная глубина потока.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

В уравнение (18) входят два неизвестных: $\bar{u} = F(x, y)$ и $gi = f(x)$; поэтому для полного решения задачи нужно иметь второе уравнение. Вторым уравнением будет служить условие неразрывности, которое для наших условий можно записать в виде определенного интеграла

$$\int_0^H \bar{u} dy = q; \tag{20}$$

q — удельный расход воды, сбрасываемой через сооружение, обычно задается.

Обозначим: $$f(x) = \frac{\partial}{\partial x} \varphi(x). \tag{21}$$

Тогда уравнение (18) может быть заменено следующим:

$$-A \frac{\partial^2 [\bar{u}^2 + \varphi(x)]}{\partial y^2} + \frac{\partial [\bar{u}^2 + \varphi(x)]}{\partial x} = 0. \tag{22}$$

Вводя вспомогательную функцию

$$u_* = \bar{u}^2 + \varphi(x), \tag{22'}$$

сведем задачу к решению уравнения теплопроводности[1]

$$-A \frac{\partial^2 u_*}{\partial y^2} + \frac{\partial u_*}{\partial x} = 0. \tag{23}$$

Граничные условия для u_* будут те же, что и для u, т. е.

$$\left(\frac{\partial u_*}{\partial y}\right)_{y=H} = \left(\frac{\partial u_*}{\partial y}\right)_{y=0} = \left(2\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}\right)_{y=H=0} = 0. \tag{24}$$

Рассмотрим решение уравнения (23) для такого случая, когда на начальном створе скорость течения распределена равномерно и охватывает по глубине только нижнюю часть сечения потока, заключенную по высоте между h_1 и h_2 (фиг. 16). На остальной части сечения скорости равны нулю, $\varphi(x)_{x=0}$ также равна нулю. Эти условия на начальном створе записываются так:

$$\left.\begin{array}{ll} \text{при } x=0 \text{ и } h_2 > y > h_1 & \bar{u} = \bar{u}_0 \\ \text{при } x=0 \text{ и } h_2 < y < h_1 & \bar{u} = 0 \end{array}\right\} \varphi(x) = 0. \tag{25}$$

Задачи с более сложным распределением скоростей на крайнем створе, как будет показано ниже, легко сводятся к такому случаю.

[1] Аналогичное решение независимо от автора настоящей статьи дал И. М. Коновалов применительно к задаче о растекании турбулентных струй. Труды Академии речного транспорта, вып. 1, 1952.

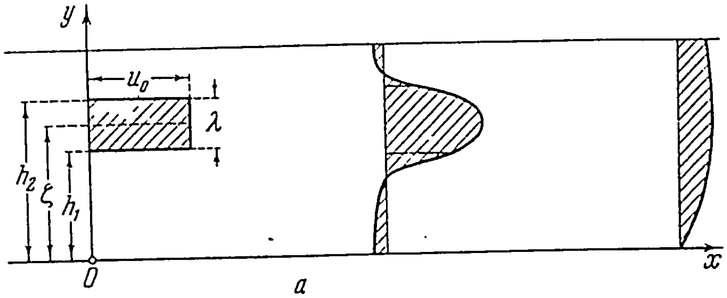
Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

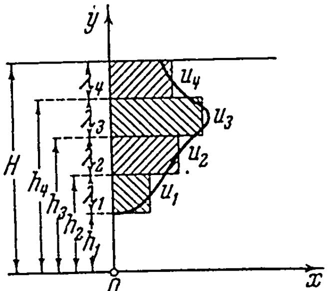
Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Граничные условия на начальном створе для вспомогательной функции u_* определятся из соотношений (22') и (25):

$$\left.\begin{array}{ll} \text{при } x=0 \text{ и } h_2>y>h_1 & u_*=u_{*0}=\bar{u}_0^2 \\ \text{при } x=0 \text{ и } h_2<y<h_1 & u_*=0 \end{array}\right\} \qquad (26)$$

Решение уравнения (23) при граничных условиях (24) сводится к задаче о плоском проводнике тепла, заключенном между двумя изоляторами. Анализ такой задачи является предметом математической физики (см. Ф. Франк и Р. Мизес [19]).





Фиг. 16. Схематизация распределения скоростей течения на начальном створе к решению уравнения (23)

В общем случае, при любом распределении u_* на начальном створе, решение представляется в виде

$$u_*=\frac{2}{H}\left\{\sum_{0}^{\infty} e^{-A\left(\frac{n\pi}{H}\right)^2 x}\cos\frac{n\pi y}{H}\int_0^H \Phi(\xi)\cos\frac{n\pi\xi}{H}\,d\xi+\frac{1}{2}\int_0^H \Phi(\xi)\,d\xi\right\}. \quad (27)$$

Здесь ξ — текущая ордината при $x=0$;
$\Phi(\xi)$ — распределение u_* на начальном створе;
n — последовательный ряд целых чисел;
H — глубина потока.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Для нашей задачи, согласно (26),

$$\Phi(\xi) = u_{*0} \text{ для } h_2 > \xi > h_1$$

и

$$\Phi(\xi) = 0 \quad \text{для } h_2 < \xi < h_1.$$

При этом входящий в (27)

$$\int_0^H \Phi(\xi) \cos\frac{n\pi}{H}\xi d\xi = \int_{h_1}^{h_2} u_{*0} \cos\frac{n\pi}{H}\xi d\xi =$$

$$= u_{*0}\frac{2H}{n\pi}\sin\frac{n\pi}{2H}(h_2 - h_1)\cos\frac{n\pi}{2H}(h_2 + h_1) \tag{28}$$

и

$$\int_0^H \Phi(\xi)\, d\xi = \int_{h_1}^{h_2} u_{*0} d\xi = u_{*0}(h_2 - h_1). \tag{29}$$

Подставляя найденные значения интегралов (28) и (29) в (27), после преобразования получим:

$$u_* = u_{*0}\left[\frac{h_2 - h_1}{H} + \frac{4}{\pi}\sum_{n=1}^{n=\infty}\frac{1}{n}e^{-A\left(\frac{n\pi}{H}\right)^2 x}\sin\frac{n\pi}{2H}(h_2 - h_1)\times\right.$$
$$\left.\times\cos\frac{n\pi}{2H}(h_2 + h_1)\cos\frac{n\pi}{H}y\right].$$

Обозначая высоту струи на начальном створе через $\lambda = h_2 - h_1$, а ординату ее центра через $\xi = \frac{h_2 + h_1}{2}$ (см. фиг. 16), заменим ими в вышеприведенном равенстве соответствующие величины. Тогда

$$u_* = u_{*0}\left[\frac{\lambda}{H} + \frac{4}{\pi}\sum_{n=1}^{n=\infty}\frac{1}{n}e^{-A\left(\frac{n\pi}{H}\right)^2 x}\sin\frac{n\pi}{2}\frac{\lambda}{H}\times\right.$$
$$\left.\times\cos n\pi\frac{\varsigma}{H}\cos n\pi\frac{y}{H}\right] \tag{30}$$

или, что то же самое [см. условия (26)],

$$u_* = \bar{u}_0^2\left[\frac{\lambda}{H} + \frac{4}{\pi}\sum_{n=1}^{n=\infty}\frac{1}{n}e^{-A\left(\frac{n\pi}{H}\right)^2 x}\sin\frac{n\pi}{2}\frac{\lambda}{H}\times\right.$$
$$\left.\times\cos n\pi\frac{\zeta}{H}\cos n\pi\frac{y}{H}\right]. \tag{31}$$

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Решения (30) и (31) получаются в виде суммы бесконечного числа членов. Однако ряд, входящий в уравнения, является сходящимся, и вычисление его большого труда не представляет.

Полученные решения пригодны также и для задач с произвольным распределением скоростей на начальном створе. В этом случае поток на начальном створе следует делить по вертикали на ряд струй (источников) и принимать скорость течения в пределах каждой струи постоянной величиной (см. фиг. 16). Общее решение этой задачи найдется сложением результатов, полученных рассмотренным выше способом для каждой струи (источника) отдельно.

Если на начальном створе $\varphi(x)_0 \neq 0$, то расчет ведется при помощи равенства (30), в котором $u_{*0} = \bar{u}_0^2 + \varphi(x)_0$. При таком начальном распределении дополнительной функции решение в большинстве задач находится путем членения u_{*0} на отдельные источники, как это пояснено выше.

В расчетные равенства входит величина A. Если сравнить ее с коэффициентом турбулентной вязкости по Буссинеску ε, то согласно (14)

$$A = \frac{\varepsilon}{2\rho\bar{u}}.$$

Коэффициент турбулентной вязкости должен зависеть от интенсивности турбулентного обмена, которая может быть поставлена в связь с произведением среднего квадратического значения вертикальных составляющих мгновенных скоростей и глубины потока H.

Положим в первом приближении, что

$$\varepsilon = \rho\sigma H.$$

Согласно лабораторным опытам С. Ф. Савельева [20], проведенным в прямоугольном лотке, среднее квадратическое значение вертикальных составляющих турбулентного обмена в центральной части потока пропорционально средней его скорости. Для скоростей и глубин, выраженных в сантиметрах, эта величина равна

$$\sigma = \frac{0{,}078U}{H^{0{,}22}}.$$

Допустим, что зависимость С. Ф. Савельева сохраняется для всех слоев потока, если среднюю скорость заменить осредненной местной скоростью. Тогда

$$\varepsilon = \rho\,\frac{0{,}078\bar{u}H}{H^{0{,}22}} = 0{,}078\rho\bar{u}H^{0{,}78}.$$

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Соответственно величина A будет равна

$$A = 0{,}039 H^{0{,}78}.$$

Опыт применения уравнения (27) показывает, что числовой коэффициент правильнее принять равным 0,034. Отсюда

$$A = 0{,}034 H^{0{,}78}. \qquad (32)$$

Порядок расчета сводится к следующему.

Если поток на расчетном участке имеет постоянную глубину (не считая начального створа; см., например, фиг. 17), то на каждой вертикали скорости вычисляются от входной эпюры скоростей. Если же очертания дна сложные (см. фиг. 11), то расчет ведется последовательно от вертикали к вертикали, причем расчетные створы назначаются по возможности ближе друг к другу, сообразуясь с конфигурацией дна.

Скорости на начальном створе возводятся в квадрат. Сообразуясь с очертанием эпюры квадратов скоростей, поток разбивают на струи; для каждой из струй устанавливаются λ, ζ и $\overline{u}_0^2$. Когда в качестве начального створа принимается промежуточная вертикаль, распределение u_* на которой установлено предшествующим расчетом, тогда это распределение u_* и принимается в качестве начального для определения u_* на последующей вертикали. Коэффициент A вычисляется по средней глубине потока между соседними вертикалями.

При постоянной глубине потока вычисления ведутся при помощи равенства (31), при расчетах от вертикали к вертикали — по (30).

Распределение скорости $\overline{u}$ разыскивается подбором. Сначала для каждого расчетного створа следует задать постоянную по глубине $\varphi(x)$ и вычесть ее из u_*. Из полученных для каждой точки створа разностей извлекается квадратный корень, значения которого, по предыдущему, являются величинами искомой скорости

$$\overline{u} = \pm \sqrt{[u_* - \varphi(x)]}.$$

Площадь эпюры распределения по глубине найденных таким образом скоростей должна быть равна удельному расходу воды. Если это условие не соблюдается, $\varphi(x)$ задается снова, и вычисления повторяются.

Сопоставление результатов расчета по приведенному выше методу с результатами измерения скоростей в лаборатории приводятся на фиг. 10, 11, 13 и 17, которые показывают приемлемое для целей практики совпадение расчетных данных с фактическими распределениями скоростей.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

В частном случае, когда ширина нижнего бьефа безгранична, уклон водной поверхности равен 0 и уравнение (18) непосредственно сводится к форме уравнения (23). Решением его, очевидно, будет равенство (27), в котором $u_* = \overline{u}^2$, а $\overline{u}_0^2$ заменяется $\overline{u}_0$.

Построения настоящего параграфа позволяют решать следующие задачи:

1) находить распределение скоростей в ковшах, устраиваемых за рисбермами плотин или в ямах размыва, если известен профиль размытого дна;

2) определять корректирующие множители α, необходимые, в частности, для решения вопросов, рассмотренных в § 1. Имея распределение скоростей по глубине потока, вычислить корректирующие множители не представляет затруднений.

$$\alpha = \frac{\frac{1}{H}\int\limits_0^H u^2 dh}{\left(\frac{1}{H}\int\limits_0^H \overline{u}\,dh\right)^2} \quad \text{и} \quad \alpha' = \frac{\frac{1}{H}\int\limits_0^H \overline{u}^3 dh}{\left(\frac{1}{H}\int\limits_0^H \overline{u}\,dh\right)^3}.$$

Для определения корректирующих множителей в плоских или близких к ним по режиму потоках построение скоростных эпюр следует выполнять, пользуясь полным решением с введением в расчет $\varphi(x)$. Для потоков с малым отношением $\frac{B_0}{B}$ можно применять решение, отвечающее случаю безграничного бьефа, т. е. при $\varphi(x) = 0$;

3) если известны величины придонных скоростей и их градиентов, при которых останавливается размыв дна, то можно рассчитывать глубину размыва за рисбермой для плоского потока (см. § 2 главы III).

§ 4. Пульсация скоростей течения

Несмотря на значительное влияние, которое оказывает степень турбулентности потока на размыв дна за рисбермами плотин, пульсация скоростей течения в пределах ямы местного размыва до последнего времени не изучалась.

Имевшиеся наблюдения за пульсацией скоростей относились преимущественно к равномерным потокам. Опытный материал, полученный в условиях неравномерного движения, т. е. в условиях, облее близких по режиму к течениям в месте деформации дна за креплением нижнего бьефа, был крайне ограничен.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Особый интерес представляют наблюдения за пульсациями в открытых потоках. Однако из числа имевшихся ранее работ, касающихся этого вопроса, можно назвать только одну, выполненную Н. А. Михайловой и И. Б. Найденовой (21) во время исследования движения песчаных гряд по дну прямолинейного лотка шириной 6,1 *см*. Пульсация наблюдалась в подвалье песчаной гряды за тыловым откосом крутизною 1 : 2; глубина потока над грядою была 1,87 *см*. Исследования сделаны с применением высокочастотной киносъемки с последующей статистической обработкой фильмов. Эти опыты дали интересный материал, освещающий турбулентность потока в обстановке увеличения глубин.

Все остальные материалы, касающиеся пульсаций при неравномерном движении воды, относятся к напорным потокам. Перечень их следующий: опыт Минского [22] над пульсацией течений в диффузорах с углами расхождения в 1 и 2°, измерения Калинского (Kalinske) [23] в сечении диффузоров с углом 6° и наблюдения Фейджа (Fage) [24] за короткой конфузорной вставкой в прямолинейной трубе.

Понятно, что перечисленные работы, кроме измерений Н. А. Михайловой и И. Б. Найденовой, не могли в достаточной мере осветить пульсационный режим в яме местного размыва. Чтобы восполнить пробел, образовавшийся в исследовании гидравлики местного размыва из-за отсутствия данных о пульсации неравномерных открытых протоков, автор обратился к Русловой лаборатории Академии наук СССР с просьбой поставить соответствующие опыты. Опыты были начаты Б. А. Фидманом. Проведен первый цикл опытов, имевший целью осветить пульсацию течений при внезапном углублении потока [25, 26]. Опыты велись в плоском лотке при разных числах Рейнольдса и с разной степенью увеличения глубины.

На первом цикле опыты в Академии наук были прерваны по организационным причинам задолго до их окончания.

Позднее аспирант Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова И. Б. Найденова по нашей просьбе включила в свою диссертационную работу измерение пульсации скоростей на модели ковша Куйбышевской ГЭС. Измерения произведены в плоском лотке в Московском инженерно-строительном институте имени В. В. Куйбышева для модели двух масштабов — 1 : 150 и 1 : 300.

Наблюдения Б. А. Фидмана и И. Б. Найденовой выполнены при помощи киносъемки и отличаются достаточной точностью.

Однако исследования Академии наук и опыты с моделью ковша Куйбышевской ГЭС производились при нормальном распределении скоростей на подходном участке и не освещают

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

пульсаций, наблюдающихся в случае донного или поверхностного режима потока.

Попытку оценить пульсацию в этом последнем случае предприняла Н. В. Халтурина во время упомянутых выше опытов над размывом дна в лаборатории Гидропроекта. Измерения велись с помощью флюгера, дающего возможность наблюдать только продольные пульсации.

Измерения Н. В. Халтуриной сделаны прибором, не приспособленным специально для фиксации пульсаций, и по своей точности уступают опытам Б. А. Фидмана и И. Б. Найденовой; тем не менее они дали возможность судить о пульсациях в яме размыва при неполностью погашенной энергии потока и благодаря этому дополняют ранее проведенные опыты.

Исследования пульсаций потока при внезапном углублении производились в лотке шириною 0,60 *м* при глубинах в лотке (за уступом) от 0,06 до 0,16 *м*; высота уступа изменялась от 0,02 до 0,08 *м*, а средняя скорость на пороге составляла в трех опытах 0,10 *м/сек* и в одном — 0,35 *м/сек* (см. табл. 4). Всего выполнено четыре опыта.

Данные этих наблюдений показывают, что непосредственно за уступом дна начинается резкое увеличение пульсаций, как вертикальных, так и продольных (фиг. 17 и 18).

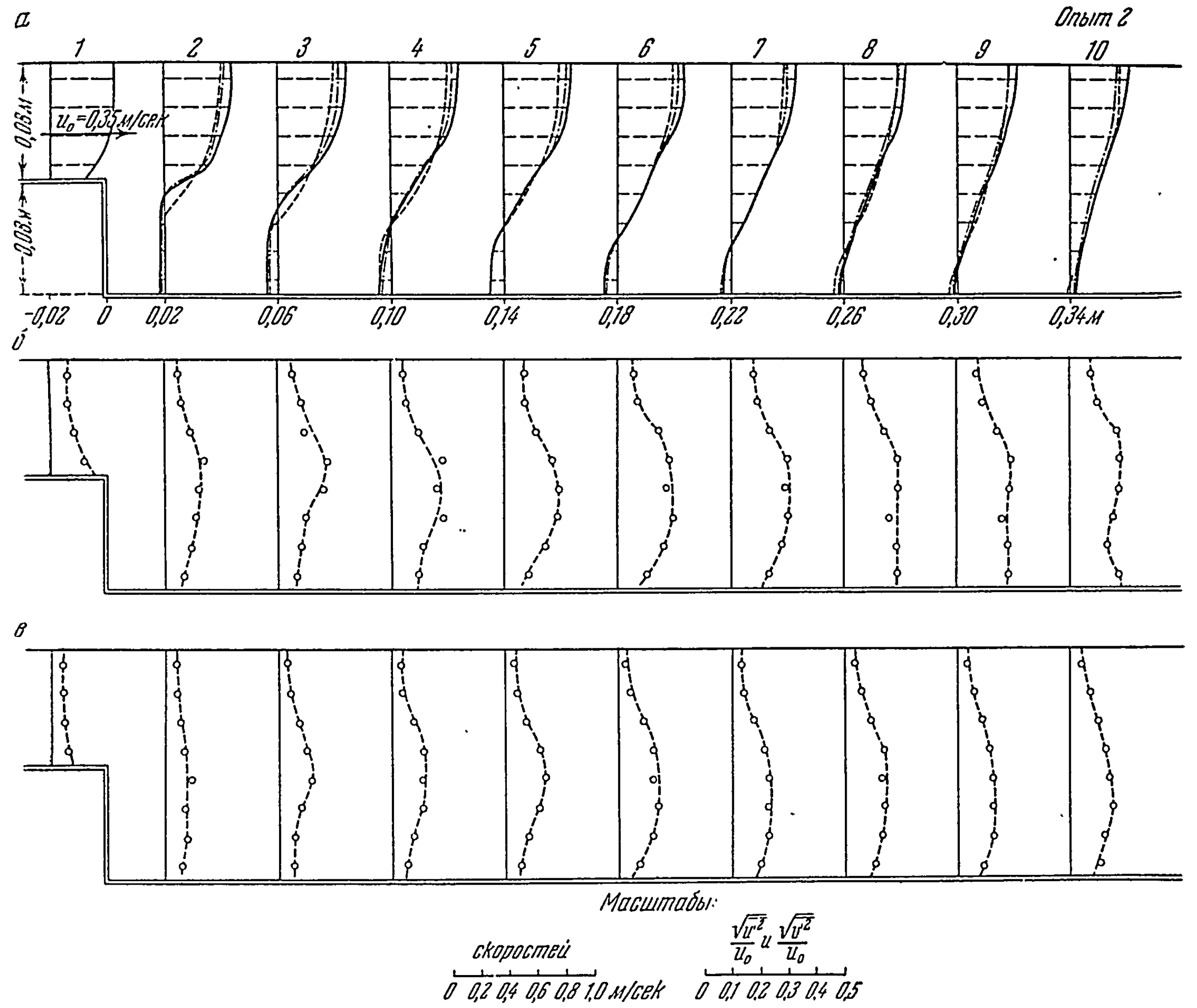
Увеличение пульсаций наблюдается сначала в области, примыкающей к границе между транзитной струей и вальцом, образующимся за уступом. По мере удаления от уступа возрастание пульсаций распространяется вниз и вверх от граничной области. Максимумы на вертикалях располагаются приблизительно на уровне порога или несколько ниже его. Наибольшей интенсивности пульсации достигают приблизительно к створу, проходящему через центр вальца (см. вертикали 5—6 на фиг. 17 и вертикали 4—5 на фиг. 18).

Относительная величина максимума продольных пульсаций на вертикали 5—8 на фиг. 17,*б*, составляет $\frac{\sqrt{\overline{u'^2_m}}}{U_0}=0{,}20$, тогда как на вертикали перед уступом наибольшее значение $\frac{\sqrt{\overline{u'^2_m}}}{U_0}=0{,}12$. Эти цифры показывают, что продольные пульсационные составляющие увеличились за уступом почти в 1,7 раза. В третьем опыте (фиг. 18, *б*) увеличение местного максимума $\sqrt{\overline{u'^2_m}}$ отмечено в 1,37 раза.

Вертикальные пульсации растут более энергично. К центру вальца наибольшее значение $\sqrt{\overline{v'^2_m}}$ на вертикали увеличилось

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

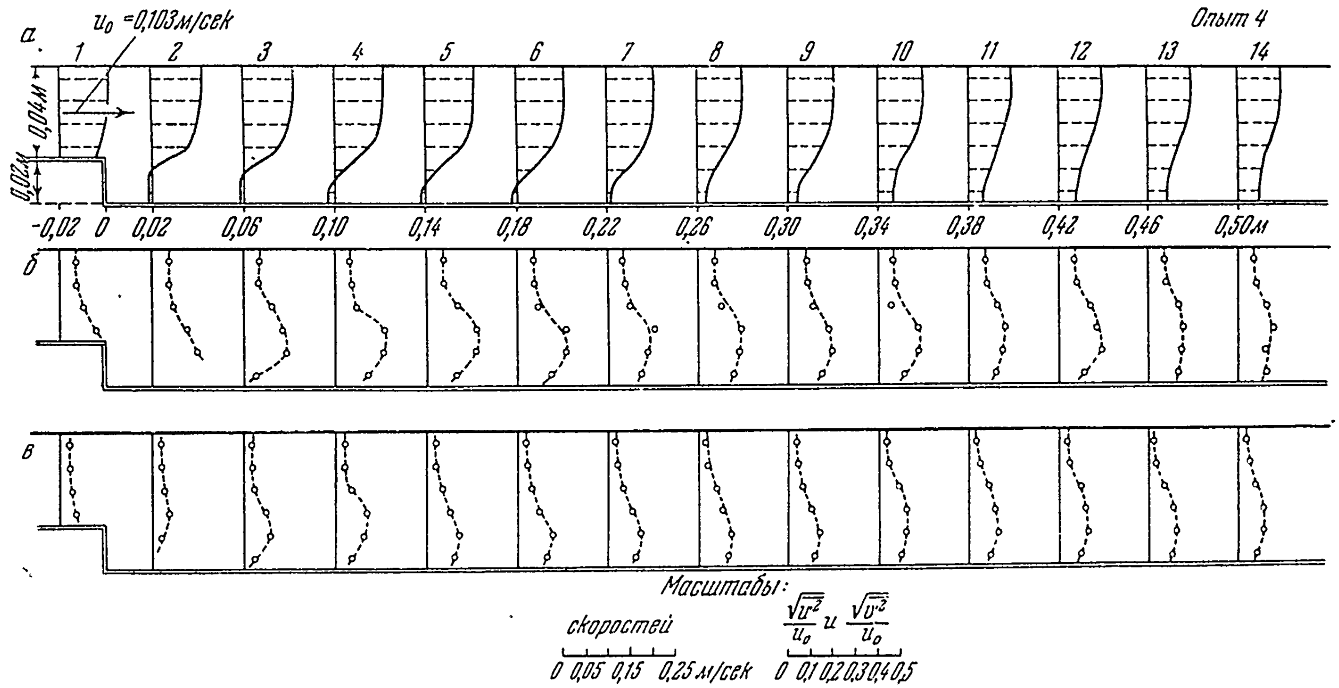


Фиг. 17. Режим скоростей течения при резком изменении глубин в плоском лотке по опытам Б. А. Фидмана. Q=0,017 $м^3/сек$; B=0,61 $м$:

а — осредненные скорости; ——— — измеренные скорости — — — — рассчитанные скорости; — · — · — · — измеренные скорости при выравненном расходе; *б* — отношение среднеквадратических значений продольных пульсаций к средней скорости на пороге $\frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{U_0}$; *в* — отношение среднеквадратических значений вертикальных пульсаций к средней скорости на пороге $\frac{\sqrt{\overline{v'^2}}}{U_0}$.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2



Фиг. 18. Режим скоростей течения при резком изменении глубин в плоском лотке по опытам Б. А. Фидмана. $Q=0{,}0025$ *м³/сек*; $B=0{,}61$ *м*:

а — осредненные скорости; *б* — отношение среднеквадратических значений продольных пульсаций к средней скорости на пороге $\frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{U_0}$; *в* — отношение среднеквадратических значений вертикальных пульсаций к средней скорости на пороге $\frac{\sqrt{\overline{v'^2}}}{U_0}$

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Таблица 4

№ опытов	u_0, м/сек.	h_0, м	Re	$\frac{h_0}{h}$	$\frac{\sqrt{\overline{u'^2_{0m}}}}{U_0}$	$\frac{\sqrt{\overline{v'^2_{0m}}}}{U_0}$	$\frac{\sqrt{\overline{u'^2_m}}}{U_0}$	$\frac{\sqrt{\overline{v'^2_m}}}{U_0}$	$\frac{\sqrt{\overline{u'^2_m}}}{\sqrt{\overline{u'^2_{0m}}}}$	$\frac{\sqrt{\overline{v'^2_m}}}{\sqrt{\overline{v'^2_{0m}}}}$	$\frac{\sqrt{\overline{u'^2_{\partial m}}}}{U_0}$	$\frac{\sqrt{\overline{v'^2_{\partial m}}}}{U_0}$	$\frac{\sqrt{\overline{u'^2_{\partial m}}}}{\sqrt{\overline{u'^2_{0m}}}}$	$\frac{\sqrt{\overline{v'^2_{\partial m}}}}{\sqrt{\overline{u'^2_{0m}}}}$
							Опыты с уступом дна							
1	0,091	0,04	2550	0,5	0,20	0,06	0,23	0,17	1,15	2,83	0,19	0,12	0,95	2,0
2	0,35	0,08	17400	0,5	0,12	0,06	0,20	0,14	1,66	2,33	0,19	0,11	1,58	1,84
3	0,10	0,08	5120	0,33	0,16	0,07	0,22	0,145	1,37	2,06	0,15	0,13	0,94	1,86
4	0,10	0,02	1360	0,67	0,20	0,06	0,35	0,24	1,75	4,0	0,25	0,16	1,25	2,67
							Опыты с моделью ковша							
1	0,22	0,124	18200	0,5	0,13	0,05	0,19	0,14	1,44	2,80	0,08	0,08	0,62	1,60
3	0,18	0,062	7430	0,5	0,12	0,05	0,21	0,145	1,75	2,90	0,10	0,08	0,83	1,60

U_0 — средняя скорость на подходе к уступу дна или ковшу;
h_0 — глубина на подходе;
h — глубина за уступом или в ковше;

$\sqrt{\overline{u'^2_m}}$ и $\sqrt{\overline{v'^2_m}}$ — наибольшие среднеквадратические значения продольной и вертикальной пульсаций за уступом дна и в ковше;

$\sqrt{\overline{u'^2_{0m}}}$ и $\sqrt{\overline{v'^2_{0m}}}$ — наибольшие среднеквадратические значений пульсационных скоростей на подходе к уступу дна или ковшу;

$\sqrt{\overline{u'^2_{\partial m}}}$ и $\sqrt{\overline{v'^2_{\partial m}}}$ — наибольшие значения среднеквадратических значения пульсаций в придонной области за уступом или в ковше.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

по сравнению с максимумом на начальном створе в 2,35 раза во втором опыте (фиг. 17, *в*) и в 2 раза — в третьем опыте (фиг. 18, *в*).

Максимум вертикальных пульсаций удерживается на указанном уровне до нижней границы вальцовой области, а за нею медленно уменьшается.

На поверхности воды пульсационные составляющие скорости не показали тенденции к изменению по длине потока. Пульсации в придонной области непосредственно за уступом невелики. По мере удаления от уступа они возрастают и достигают наибольших значений к концу вальца; ниже, за вальцом, значения $\sqrt{\overline{u'^2_д}}$ и $\sqrt{\overline{v'^2_д}}$ постепенно уменьшаются. Если сравнить придонные пульсации за уступом дна с придонными пульсациями перед уступом, то значительное увеличение можно заметить только для вертикальных составляющих, среднеквадратическое значение которых возросло приблизительно в два раза. Степень увеличения продольных составляющих меньше, чем вертикальных, и убывает с изменением высоты порога (см. табл. 4). Следует подчеркнуть, что в опыте, в котором высота уступа равнялась одной трети глубины воды за уступом, продольные пульсации на всех вертикалях оставались меньше продольной пульсации на подходном участке.

На фиг. 19 показаны изменения вдоль потока осредненных по глубине величин продольных и вертикальных пульсаций.

Согласно фиг. 19, нарастание средних по глубине пульсаций заканчивается в нижней части вальцовой области.

Число Рейнольдса, как это отмечает в своих выводах Б. А. Фидман [25], оказывает малое влияние на режим пульсаций за уступом дна. Относительная величина среднеквадратичных значений $\frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{u_0}$ и $\frac{\sqrt{\overline{v'^2}}}{u_0}$ немного уменьшается с ростом числа Рейнольдса. В значительно большей мере поле пульсаций зависит от высоты порога. Это можно проследить по данным табл. 4, в которой сведены некоторые результаты опытов.

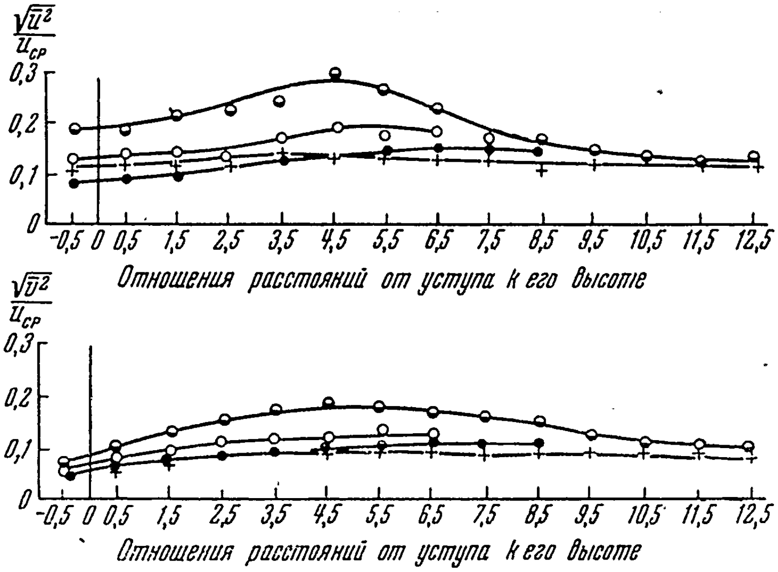
Наблюдения за моделью ковша Куйбышевской плотины ставились в лотке шириною 0,315 *м* при глубине воды в наиболее глубокой части ковша 0,248 и 0,124 *м*. Средняя скорость течения на подходе к ковшу составляла, соответственно, 0,22 и 0,18 *м/сек*.

Так же как и за уступом дна, в ковше наблюдается усиление турбулентности потока по сравнению с турбулентностью на подходном участке потока (фиг. 20).

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Усиление турбулентности отмечено в обоих опытах. Наибольшие значения местных максимумов близки к тем, которые измерены в опытах с уступом дна (см. фиг. 17, 18 и 20). Местный максимум продольных пульсаций наблюдается у середины верхового откоса и удерживается до конца откоса. Максимум вертикальных пульсаций устанавливается в конце откоса.



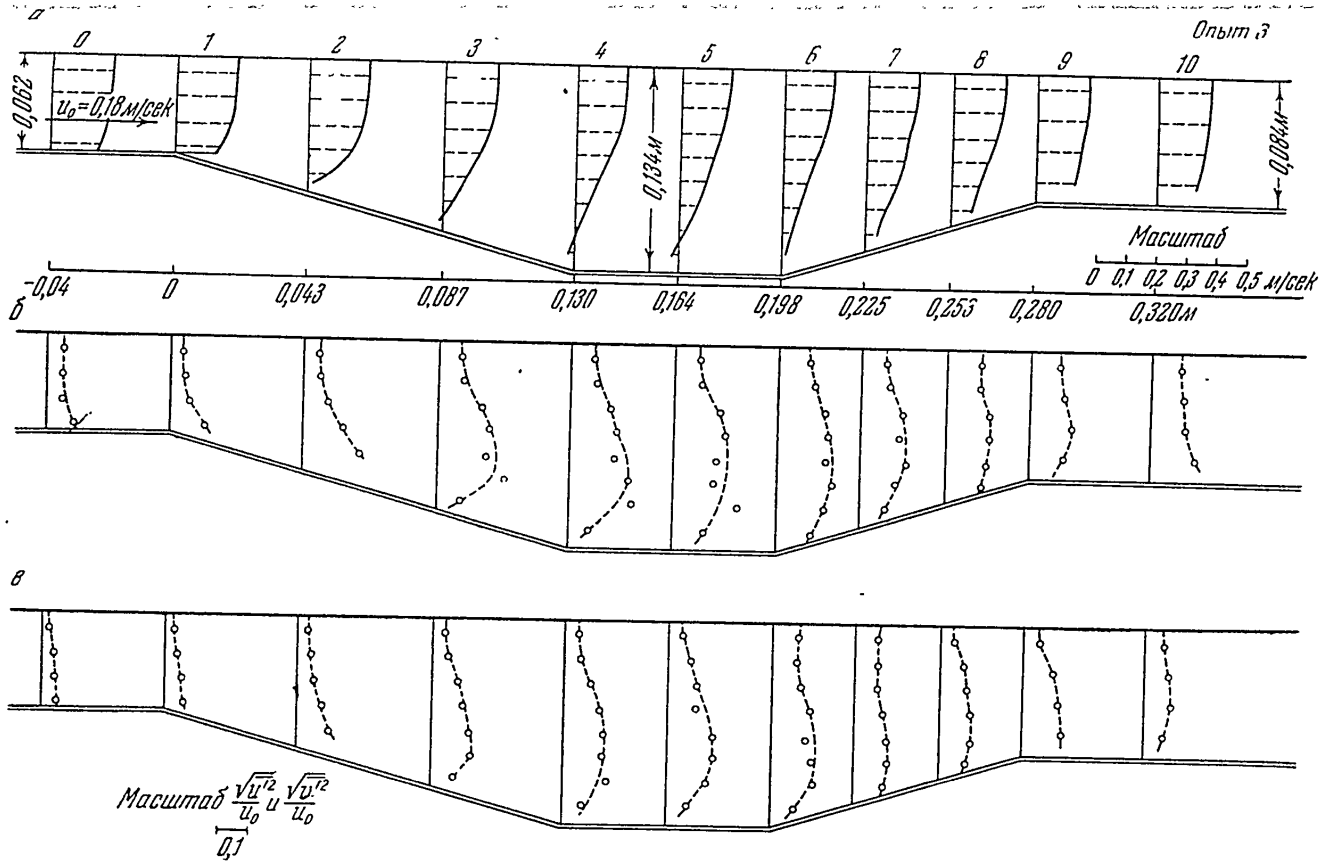
Фиг. 19. Изменение по длине лотка отношений осредненных по глубине среднеквадратических пульсаций к средней скорости перед уступом по опытам Б. А. Фидмана: ○ — опыт 1; ● — опыт 2; + — опыт 3; ⊖ — опыт 4.

На горизонтальном участке дна в ковше замечается некоторое выравнивание продольных и вертикальных пульсаций по глубине потока. Выравнивание завершается в пределах низового откоса (в конфузорной части ковша). К выравниванию скорости, собственно, и сводится роль низового откоса. Величина максимума как продольных, так и вертикальных пульсаций на обратном откосе несколько уменьшается.

В придонной области потока увеличение пульсаций в ковше происходит в меньшей степени, чем за уступом дна. В ковше величина $\sqrt{\overline{u'^2_\partial}}$ не превышает соответствующего значения на подходе. $\sqrt{\overline{v'^2_\partial}}$ в пределах верхового откоса и средней части ковша больше $\sqrt{\overline{v'^2_{om}}}$ перед ковшом в 1,6 раза, тогда как при внезапном углублении потока придонные вертикальные пульсации увеличиваются почти в два раза (см. выше).

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2



Фиг. 20. Режим скоростей течения на модели ковша по опытам И. Б. Найденовой. $Q=0{,}0035$ $м^3/сек$; $B=0{,}315$ м:

а — осредненные скорости; *б* — отношение среднеквадратических значений продольных пульсаций к средней скорости на подходе $\frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{U_0}$; *в* — отношение среднеквадратических значений вертикальных пульсаций к средней скорости на подходе $\frac{\sqrt{\overline{v'^2}}}{U_0}$

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

На нижней границе вальцовой области пульсации в придонном слое потока в ковше почти в 1,5 раза меньше наблюдавшихся в конце вальцов за уступом при тех же отношениях $\frac{h_0}{h}$ и скоростях течения на подходе (см. данные двух последних столбцов в табл. 4).

Измерения пульсаций в ямах размыва производились при помощи флюгера в лотке шириной 1,5 *м*, в котором исследовался размыв дна за водосливом. Глубина на водобое поддерживалась равной 0,15 *м*; средняя скорость 0,40 *м/сек*.

О качестве измерений флюгером можно составить представление по фиг. 21, на которой проведено сравнение относительных величин среднеквадратического отклонения скоростей течения в направлении общего движения $\frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{u_0}$ по опытам Н. В. Халтуриной и И. Б. Найденовой. В обоих сравниваемых опытах поток сходил с закрепленной части русла с таким распределением скоростей, которое соответствует равномерному режиму. Сопоставление показывает близкое совпадение не только качественных, но и количественных результатов.

Результаты опытов над пульсацией в ямах размыва при различных режимах на водобое показаны на фиг. 10, 11 и 12.

При нормальном режиме скоростей в конце водобоя в яме размыва наблюдается режим пульсаций, аналогичный режиму в ковше на участке верхового откоса и горизонтального дна.

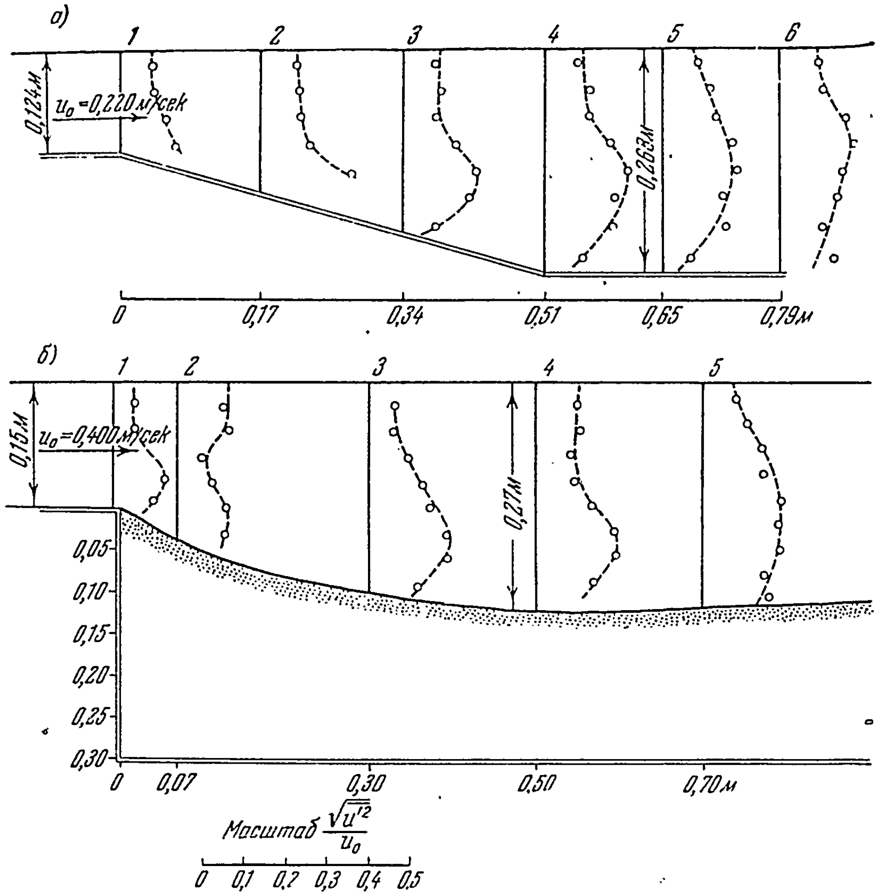
Иной режим пульсаций наблюдается при сходе с рисбермы неуспокоенного потока. При поверхностном и донном режимах, в отличие от режима нормального, пульсация скоростей обладает очень большой интенсивностью (что видно из сравнения фиг. 11, *б* и 12, *б* с фиг. 10, *б*). В этих условиях в яме размыва происходит не возбуждение возмущений, а их гашение. Снижение пульсаций заметно в верхней части откоса, непосредственно за концом крепления. Далее в пределах откоса осредненное по глубине значение $\sqrt{\overline{u^2}}$ сохраняется почти неизменным и начинает уменьшаться лишь за нижней границей вальца. Не исключено, что такие изменения интенсивности возмущений объясняются малой точностью измерений, обусловленной несовершенством прибора, особенно для замера интенсивных пульсаций. Тем не менее интересно отметить, что в зоне наибольшего размыва в среднем по глубине среднеквадратические пульсации составляют 0,7—0,8 от соответственных значений на водобое. В придонных слоях потока это уменьшение в отдельных случаях, повидимому, может быть значительно большим (см. фиг. 11, *б*).

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Рост пульсаций скоростей течения в диффузорных частях потока наблюдался и ранее в напорных трубах с малыми углами расхождения (см. [22, 23]).

Рассмотренные опыты в открытых потоках с увеличивающимися глубинами подтвердили усиление возмущений только при



Фиг. 21. Сопоставление среднеквадратических величин продольных пульсаций, измеренных при помощи киносъемки на модели ковша ($а$ — $Q = 0{,}0086$ $м^3/сек$; $B = 0{,}315$ $м$), с среднеквадратическими величинами продольной пульсации, измеренными флюгером в яме размыва ($б$ — $Q = 0{,}090$ $м^3/сек$; $B = 1{,}5$ $м$)

нормальном режиме потока на подходе к месту углубления дна. Если же поток подходит к месту увеличения глубин сильно пульсирующим, то в диффузорных частях потока происходит не усиление, а гашение пульсаций.

Этот результат можно объяснить, если допустить зависимость пульсаций от градиентов осредненных скоростей тече-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

ния. Наличие такой зависимости давно предполагается в гидродинамике.

Практическое выяснение связи между интенсивностью пульсаций и вертикальным градиентом осредненных скоростей облегчается при наличии наблюдений за режимом скоростей в областях потока с значительными градиентами. Этому условию удовлетворяют вальцевые области потока. Исходя из этого, данные описанных опытов с донными уступами и ковшом, проводившихся с нормальным режимом на подходе, были использованы для получения указанных связей.

Стремясь по возможности исключить влияние инерции, в опытах выбирали те вертикали со значительными скоростными градиентами, в районе которых изменение осредненных и пульсационных скоростей вдоль потока было не очень большим. В опытах с уступом дна такими вертикалями являются те, которые расположены вблизи центра вальца, а в опытах с ковшом — участок горизонтального дна.

Распределение сопоставляемых величин по глубине потока для некоторых опытов показано на фиг. 22. Как можно судить, характер распределения пульсаций в общем близок к распределению градиентов. Количественные соотношения между сравниваемыми величинами оказались зависящими от глубины потока на вертикали. В первом приближении в качестве аргумента, отражающего влияние глубины потока на величину пульсаций, можно принять произведение $H^{0,5}\frac{d\bar{u}}{dy}$.

Связь $\sqrt{\overline{u'^2}}$ и $\sqrt{\overline{v'^2}}$ с $H^{0,5}\frac{d\bar{u}}{dy}$ графически представлена на фиг. 23. На графики наложены данные всех опытов с уступом дна и моделью ковша. Кроме того, на графиках помещены результаты опытов Минского [22] над пульсацией скоростей при равномерном течении в открытом лотке.

Хотя разброс точек значительный, тем не менее расположение их свидетельствует о наличии связи между рассматриваемыми величинами и при том более или менее общей для разных по своему характеру потоков.

На графике объединены данные для равномерного и неравномерных потоков, для потоков с резким изменением глубины и с постепенным переходом от малой глубины к большой по откосу 1 : 4.

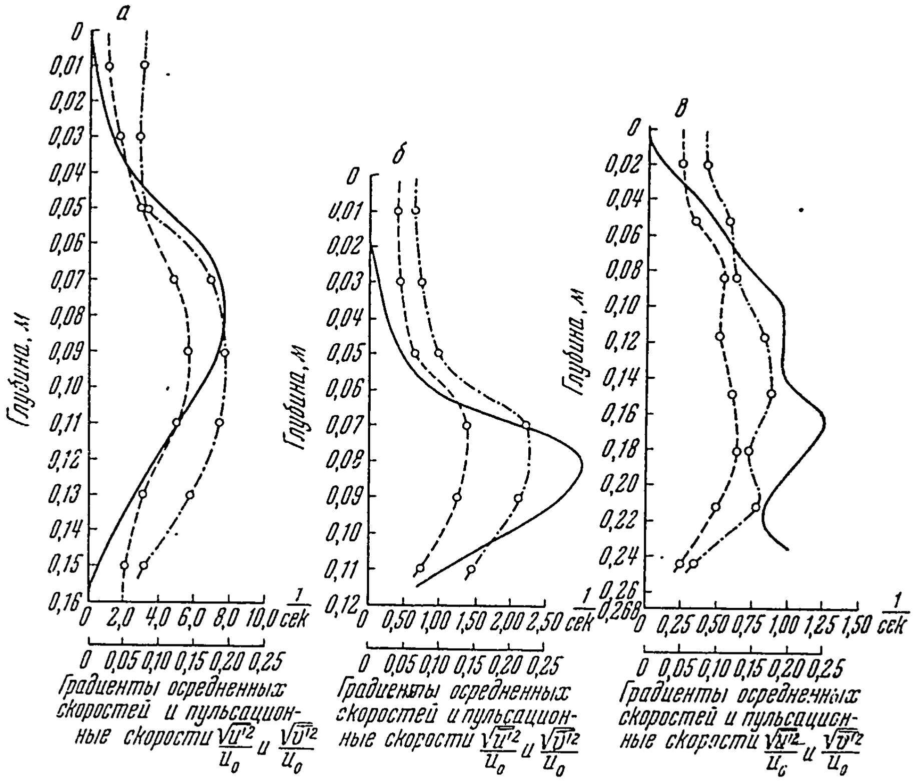
Глубины воды варьировались от 6 до 26 *см*, а средние скорости течения в подходной части потока — от 9,6 до 35 *см/сек*.

Разброс точек на графиках связи в значительной части объясняется наличием инерции пульсаций, а также и инерции

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

осредненных скоростей. Освободиться полностью от этого явления в неравномерном потоке невозможно, основывать же



Фиг. 22. Распределение по глубине потока градиентов осредненной скорости и среднеквадратических значений продольных и вертикальных пульсаций:

а — опыт 2 с порогом, эпюра 5 (см. фиг. 17); *б* — опыт 3 с порогом, эпюра 4 [25]; *в* — опыт с ковшом, эпюра 5. — $\frac{\Delta u}{\Delta h}$, — — — $\frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{U_0}$, — · — · — $\frac{\sqrt{\overline{v'^2}}}{U_0}$; U_0 — средняя скорость на пороге

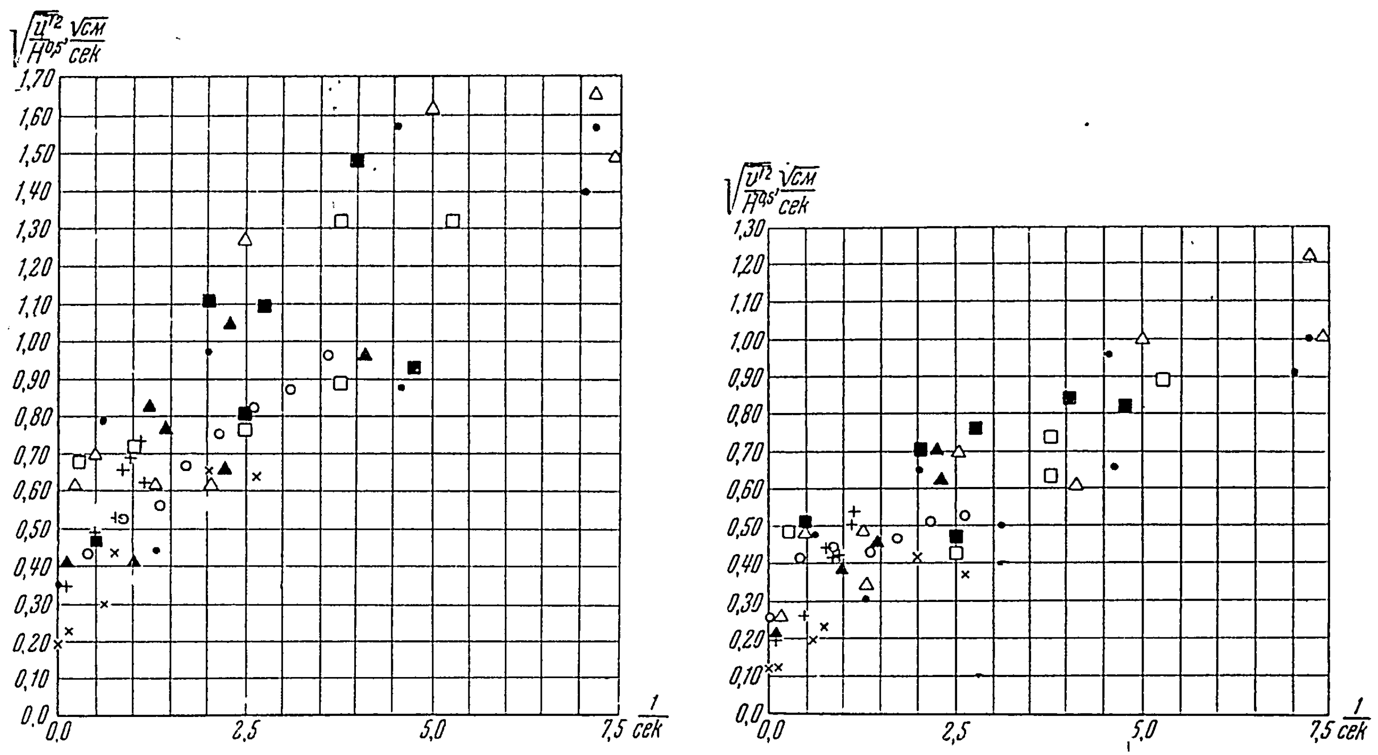
связи только на данных о равномерном течении оказывается недостаточным, во-первых, из-за подобия турбулентных потоков и, во-вторых, из-за существенного влияния дна на распределение по глубине вертикальных пульсаций $\sqrt{\overline{v'^2}}$.

Наличие связи между пульсациями, глубиной и градиентами осредненных скоростей позволяет объяснить явления, наблюдавшиеся в рассмотренных опытах.

Повышение степени турбулентности в местах увеличения глубины, когда к таким местам подходит равномерный поток

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2



Фиг. 23. График связи $\frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{H^{0,5}}$ и $\frac{\sqrt{\overline{v'^2}}}{H^{0,5}}$ с местными градиентами осредненных скоростей $\frac{\Delta u}{\Delta h}$; H — глубина воды на вертикали.

Опыты с уступом дна [25]: ● — вертикаль 4 опыта 2; △ — вертикаль 5 опыта 2; ■ — вертикаль 5 опыта 3; □ — вертикаль 4 опыта 3; × — вертикаль 4 опыта 4; ○ — опыт Минского в равномерном потоке [21].
Опыты с ковшом: + — вертикаль 5 опыта 1; ▲ — вертикаль 5 опыта 3

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

со свойственными ему относительно небольшими возмущениями, происходит, во-первых, в силу самого факта увеличения глубины и, во-вторых, в результате сопутствующего углублению потока возрастания градиентов осредненных скоростей. Особенно резко градиенты увеличиваются в зонах вальцовых движений воды. Поэтому в этих зонах усиление пульсации значительно.

Если же поток на участке подхода обладает очень интенсивной пульсацией, то увеличенные градиенты осредненных скоростей в зоне углубления потока могут оказаться недостаточно большими не только для усиления пульсаций, но даже для их поддержания. В этом случае в диффузорной части потока должно происходить успокоение потока, что и наблюдалось в опытах № 4 и 7 (см. фиг. 11 и 12).

Подводя итоги сказанному в настоящем параграфе, необходимо подчеркнуть следующее.

1. В сечениях потока, расположенных за понижением дна, интенсивность пульсаций в придонной области оказывается большей при уступообразном понижении дна, чем при плавном сопряжении глубин откосом.

2. Если в пределах водобоя и рисбермы поток, сброшенный с плотины, полностью успокаивается и подходит к месту размыва с нормальным распределением скоростей по вертикали, в яме размыва из-за увеличения вертикальных градиентов осредненных поступательных скоростей интенсивность пульсации возрастает. Наиболее сильной пульсация оказывается в месте максимального размыва дна. Если же к концу рисбермы поток подходит сильно возмущенным (при резко выраженном поверхностном или донном режиме), то с вступлением в пределы ямы размыва в нем происходит гашение пульсаций. Следует иметь в виду, что в рассматриваемом случае частично погашенные пульсации могут по абсолютной величине превышать пульсации, соответствующие нормальному режиму сбегающего потока.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Глава III

РАЗМЫВ ДНА В НИЖНЕМ БЬЕФЕ ВОДОСБРОСНЫХ СООРУЖЕНИЙ

§ 1. Причины размыва дна в нижнем бьефе

Размыв дна реки в нижнем бьефе плотин и гидростанций происходит по двум причинам. Первая из них заключается в том, что вода, перед тем как поступить к сооружениям, проходит подпертый участок реки с малыми скоростями течения. В пределах этого участка влекомые водой наносы частично или полностью выпадают. В нижнем бьефе скорости течения воды вновь приближаются к естественным скоростям реки, транспортирующая способность реки восстанавливается, и вода начинает насыщаться наносами за счет размывания дна. Размыв дна осветленным потоком происходит длительное время и прекращается только тогда, когда зона подпора полностью заиливается и в нижний бьеф снова начинают поступать все приносимые рекою сверху наносы. Большие водохранилища на равнинных реках заиливаются в течение сотен лет. За этот период размыв русла ниже подпертых сооружений охватывает участок реки значительного протяжения. Деформации начинаются непосредственно ниже плотины и постепенно спускаются по течению.

Вторая причина углубления дна за сооружениями заключается в том, что сооружения эти нарушают бытовой режим скоростей течения.

Скоростной режим нарушается на коротком участке реки в районе самого гидроузла, поэтому связанный с искажением скоростей размыв дна представляет собой чисто местное явление.

Непосредственно за сооружениями общий и местный размывы накладываются друг на друга. Вследствие этого глубина ямы местного размыва определяется как характером нарушения скоростей течения, так и степенью осветления потока.

Из § 1 предыдущей главы видно, что при нарастании глубин вдоль потока в пространственных условиях происходит увеличение удельных расходов воды. Так как размыв дна в нижнем бьефе, как правило, влечет за собой углубление дна за рисбермой, то повышение удельных расходов над ямой местного размыва должно быть обязательным. Поэтому в обстановке пространственного потока следует ожидать бóльших размывов дна, чем в плоских потоках при одинаковых характеристиках течений на рисберме и при сходном качестве грунта.

Глубина местного размыва, за исключением некоторых случаев воздействия на дно отогнанного прыжка, зависит от рода

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

грунта, из которого сложено размываемое потоком дно реки, и уменьшается с уменьшением подвижности последнего.

На глубину размыва оказывает влияние неоднородность грунта. Даже относительно небольшое содержание крупных частиц в мелком подвижном грунте может, вследствие образования отмостки дна, ограничить размыв и воспрепятствовать ему развиться до той глубины, которая была бы достигнута при отсутствии в грунте крупных включений.

Исследования глубин местного размыва проводились в основном применительно к условиям работы крупных водохранилищ в предположении, что поток полностью свободен от русловоформирующих фракций наносов. Для случаев же, когда в нижний бьеф сбрасывается существенное количество наносов, которое может оказать влияние на глубину местного размыва, рекомендуется ограничиться ориентировочным расчетом.

В процессе общего размыва русла реки в нижнем бьефе происходит понижение уровня воды. Это явление должно учитываться при оценке глубины местного размыва, когда процесс общего размыва протекает интенсивно, например на горных реках с большим падением. При необходимости учитывать этот процесс расчет местного размыва проводится применительно к пониженному уровню воды, устанавливаемому по результатам расчета общего понижения дна. Методика такого расчета рассматривается в специальной литературе (см., например, [8]).

Влияние на глубину размыва различных гидравлических режимов, устанавливающихся в конце рисбермы, рассмотрено для плоского потока. В пространственном потоке это влияние несколько сглаживается наличием водоворотных областей или неравномерностью удельных расходов по ширине водосливного фронта.

§ 2. Размыв дна в плоском потоке

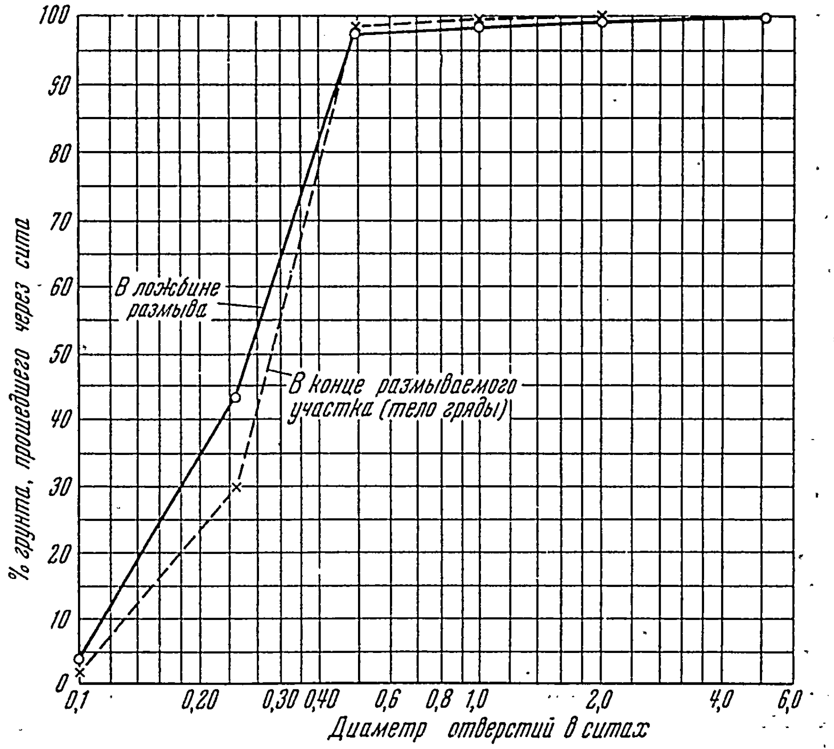
Как показано выше, глубина местного размыва за плотинами зависит от осветления потока в верхнем бьефе и от изменения скоростного режима под влиянием сооружений. В соответствии с этим в настоящем параграфе показаны особенности размыва для случаев: а) затопленного прыжка при полностью успокоенном потоке в пределах закрепленной части русла, б) затопленного прыжка с поверхностным или донным распределением скоростей в конце рисбермы и в) отогнанного прыжка.

В дополнение к лабораторным экспериментам и натурным наблюдениям, выполненным в СССР рядом исследователей и организаций, для изучения размыва дна в нижнем бьефе осветленным потоком при различных режимах скоростей

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

течения в условиях затопленного прыжка по инициативе и под руководством автора были проведены опыты в плоском лотке шириною 1,50 *м*. При этом было подробно обследовано скоростное поле в яме размыва. Каждый опыт отличался сравнительно большой продолжительностью.



Фиг. 24. Гранулометрический состав песка в опытах над местным размывом в лотке шириною 1,50 *м*

В лотке устанавливался водослив практического профиля. Длина крепления за водосливом составляла 1,5 *м*. Размываемая часть русла формировалась из песка, состав которого приведен на фиг. 24.

Глубина воды в конце рисбермы устанавливалась равной 0,15 *м*. Для сравнимости результатов расход воды во всех опытах принимался один и тот же — 0,090 $м^3/сек$.

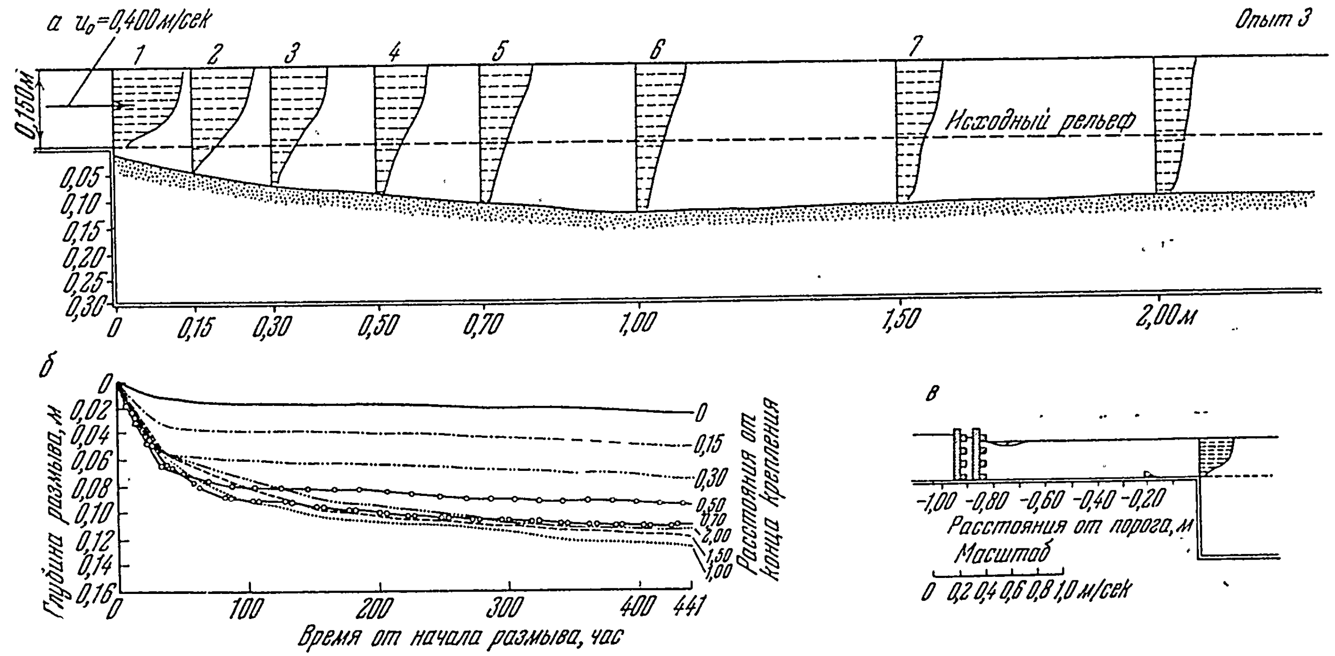
Различные режимы скоростей в конце крепления достигались установкой на водобое тех или иных гасителей или устройств, усиливающих возмущение потока. Схемы установки показаны на фиг. 10, 11, 12, 13 и 25*.

---

* Во всех опытах вода поступала чистая, без наносов.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2



Фиг. 25. Размыв дна полностью успокоенным потоком с уменьшенными донными скоростями в конце крепления; опыт 3 в плоском лотке шириною 1,5 *м*, Q=0,090 *м³/сек*:

а — профиль размыва и распределение скоростей; *б* — ход размыва; *в* — схема установки.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Продолжительность размыва дна в каждом из основных опытов достигала 200 часов. Один из опытов выдерживался до 425 часов.

При анализе рассматриваемого явления были учтены также материалы экспериментов, проведенных автором совместно с А. Д. Халтуриным в лотке шириною 0,30 *м*. В опытах использовался песок того же состава. Расходы воды менялись от 0,021 до 0,042 *м*³/*сек*. Глубина в конце закрепленной части лотка составляла 0,13—0,15 *м*. Продолжительность опытов колебалась от 21 до 117 часов.

Нам представляется правильным начать рассмотрение явлений размыва дна для затопленного прыжка с нормального режима, при котором распределение скоростей течения в конце рисбермы соответствует полностью успокоенному равномерному режиму. При проектировании крупных плотин на мягких, легко подвижных основаниях такой режим обычно достигается выбором надлежащей системы гашения энергии сбрасываемого через водослив потока, а также достаточной длиной крепления.

При нормальном распределении скоростей течения в конце рисбермы, как показывают лабораторные наблюдения в плоских лотках, деформации дна за креплением протекают следующим образом.

В начале процесса, когда поток углубляет дно в верхней части размываемого участка, за креплением образуется небольшой валец. Валец вымывает в дне небольшое углубление овальной формы, которое, по мере распространения размыва вниз по течению и в глубину, забрасывается наносами снизу. Образуется плавный откос, сопрягающий высокие отметки закрепленной части русла с низкими отметками размытого дна (см. фиг. 9, *а*, 10 и 25). С установлением откоса и исчезновением углубления, размытого вальцом, исчезает и сам валец.

Скорости течения на песчаном откосе приобретают такое распределение по вертикали, при котором в придонной области (на откосе) скорости близки к нулевым значениям. В лабораторных условиях придонные скорости настолько малы, что лежат в пределах чувствительности измерительных инструментов.

Малые значения, однако, свойственны только осредненным скоростям течения, мгновенные же значения пульсационных составляющих скорости достигают у поверхности откоса существенных положительных и отрицательных величин. Песок по откосу непрерывно движется, то подымаясь по откосу, то опускаясь в сторону подошвы. При этом в течение длительного времени сохраняется неизменное заложение откоса. Длительность одного из описанных опытов над размывом дна

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

доходила до 425 часов; в течение этого времени сформировавшийся откос не деформировался. Устойчивость откоса при описанном скоростном режиме, разумеется, возможна только в том случае, когда вверх и вниз по откосу проходят равные количества песка. Это условие может быть выполнено, очевидно, или при нулевом значении осредненной скорости течения у дна, или при очень малых обратных скоростях, направленных от подошвы откоса к его верхней бровке.

Наблюдения показывают, что движущиеся по откосу частицы грунта время от времени отрываются от поверхности откоса и уносятся потоком во взвешенном состоянии. Возмещаются ли откосу эти унесенные во взвешенном состоянии частицы или нет, проследить пока не удалось. Если взвешиваемые частицы не возмещаются, то откос должен с течением времени разрушаться, однако в этом случае процесс разрушения, вероятно, идет крайне медленно, о чем свидетельствует отмечаемый всеми лабораторными опытами факт устойчивости откоса, образовавшегося после размыва дна.

У подошвы откоса устанавливается наибольшая глубина размыва. Ниже дно немного повышается и переходит в горизонтальное положение. На этом участке русла, как показывают наблюдения, размыв идет до тех пор, пока скорость течения, уменьшающаяся по мере углубления дна, не опустится до неразмывающих грунт значений, и дальнейшее движение песка прекратится.

Некоторое увеличение глубины непосредственно за откосом объясняется своеобразным режимом течения в придонной области. Как было показано выше (§ 2 главы II), осредненная скорость течения в месте наибольшего размыва близка к нулю и лежащие здесь частицы находятся только под воздействием переменных по знаку пульсационных скоростей.

Постоянно меняя свое направление, пульсационные скорости расшатывают песчаники, в результате чего частицы грунта теряют устойчивость и легко выносятся в те моменты, когда появляется редкая по повторяемости, но наибольшая по величине мгновенная пульсационная скорость. Ниже, где в придонной области восстанавливаются постоянно направленные осредненные течения, расшатывание частиц затухает и размыв дна останавливается на более высоких отметках. Таким образом, у подошвы откоса неразмывающая скорость течения оказывается меньше неразмывающей скорости в условиях равномерного потока.

При сравнительно однородном песке переуглубление дна за откосом невелико. Опыт продолжительностью 425 часов ближе всего подошел к стабилизации дна: отношение глубины потока в месте наибольшего размыва к глубине в конце рабо-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

чей части лотка составляет всего лишь 1,05 (см. фиг. 25). То же соотношение получено в опыте при ширине лотка 0,30 *м* при средних скоростях на подходе к месту размыва 0,60 и 0,80 *м/сек*. В дальнейшем этот коэффициент должен быть проверен для разных грунтов и в большем диапазоне скоростей.

Согласно сказанному, при осветленном потоке и нормальном режиме скоростей в конце крепления наибольшая глубина потока в яме размыва h должна удовлетворять равенству

$$h = 1{,}05 \frac{q}{U_h}, \tag{33}$$

где q — удельный расход воды;

U_h — неразмывающая дно скорость течения.

Опыт показывает, что значение неразмывающей средней скорости потока U_h увеличивается с глубиной. Поэтому величину неразмывающей средней скорости потока относят обычно к глубине, которой она соответствует. Так, нормы на проектирование гидротехнических сооружений дают нормируемые значения неразмывающей скорости для глубины в 1 *м*.

Обычно принимают, что значения неразмывающих скоростей возрастают пропорционально глубине, возведенной в степень 0,2 *. Соответственно переход от нормируемых значений к фактической неразмывающей скорости при заданной глубине может быть найден из соотношения

$$U_h = U_H \left(\frac{h}{1{,}05}\right)^{0{,}2}, \tag{34}$$

где U_h — неразмывающая средняя скорость потока при глубине h *м*;

U_H — неразмывающая скорость при глубине 1 *м*.

Совместное решение равенств (33) и (34) дает расчетную формулу для определения глубины плоского потока в месте наибольшего размыва при затопленном режиме и нормальном распределении скоростей в конце рисбермы:

$$h = 1{,}05 \sqrt[1{,}2]{\frac{q}{U_H}} \text{ (в метрах)}. \tag{35}$$

Неразмывающая скорость для песков, использованных в опытах, определена специально поставленными испытаниями по моменту трогания отдельных частиц. Она оказалась равна 0,15 *м/сек* в точке, находящейся на расстоянии 0,006 *м* от дна. Пересчет к средней скорости при глубине потока 1 *м* дает $U_H = 0{,}35$ *м/сек*. В связи с тем, что влечение зерен песка заканчивается обычно при меньшей скорости, нежели скорость,

* Это соотношение было предложено В. Н. Гончаровым.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

при которой начинается их трогание, неразмывающую скорость для случая размыва правильнее принять примерно равной 0,30 *м/сек.*

Определение по равенству (35) наибольшей глубины размыва для опытов, показанных на фиг. 10 и 25, даст величину 0,27 *м*, что почти не отличается от глубины, наблюдавшейся в опыте.

Следует отметить, что равенство (35) справедливо только при том условии, что к месту размыва не поступают наносы сверху. В практических случаях это соответствует полной аккумуляции в водохранилище крупных наносов, т. е. таких фракций, которые встречаются в донных отложениях реки. Если же часть крупных наносов сбрасывается через водослив в нижний бьеф, то размыв дна за рисбермой должен прекращаться на более высоких отметках, так как часть энергии потока будет расходоваться на перемещение сброшенных из верхнего бьефа наносов. В этом случае расчет по равенству (35) даст величину углубления дна с некоторым запасом.

Если в нижний бьеф сбрасывается значительное количество наносов и запасы в расчете по (35) оказываются чрезмерно большими, то в первом приближении до накопления опытных данных неразмывающую скорость можно принимать равной скорости течения воды в верхнем бьефе с поправкой на разницу глубин в бьефах, т. е.

$$U_h = U_b \frac{h^{0,2}}{h_b^{0,2}}, \qquad (36)$$

где U_b — средняя скорость течения;

h_b — глубина воды в верхнем бьефе на приплотинном участке водохранилища.

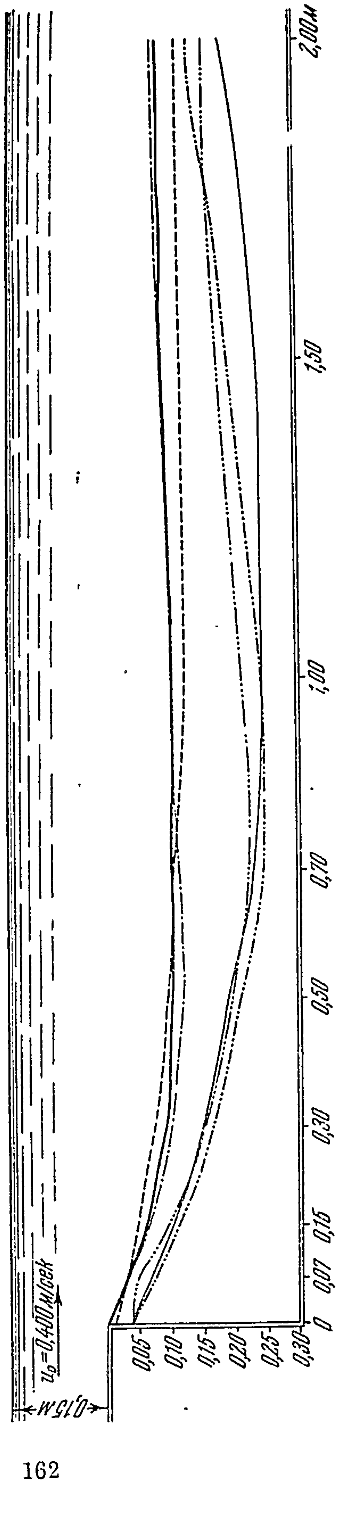
Равенство (35) пригодно также для оценки размывов при нормальном режиме скоростей, но с придонными скоростями, уменьшенными повышенной шероховатостью дна или небольшими гасителями, не возбуждающими значительных пульсаций. Разница по сравнению с рассмотренным выше случаем будет заключаться лишь в удаленности места наибольшего размыва от конца рисбермы. Откос за креплением оказывается более пологим и, следовательно, более длинным (см. фиг. 25).

При поверхностном и донном режимах в конце крепления, сопровождающихся повышенной пульсацией скоростей (см. фиг. 11, 12, 13), глубина размыва существенно возрастает. Крепление, как правило, подмывается вальцом, образующимся в пределах верхнего откоса.

Высота подмываемого уступа во всех выполненных опытах с режимами, отличающимися от нормального, устанавливалась

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2



Фиг. 26. Совмещенные профили местного размыва при различных гидравлических режимах в конце крепления по опытам в лотке шириной 1,5 *м*; Q=0,090 *м³/сек*

——— опыт 2, продолжительность 215 час.; — — — опыт 3, продолжительность 441 час.; — .. — .. — опыт 4, продолжительность 255 час.; — . — . — опыт 6, продолжительность 199 час.; — ... — ... — опыт 7, продолжительность 288 час.; ——— опыт 8, продолжительность 428 час.; опыты 2 и 6 с нормальным режимом скоростей в конце водобоя; опыт 3 с нормальным режимом при уменьшенных донных скоростях; опыт 4 с поверхностным режимом; опыты 7 и 8 с донным режимом

около одной трети от глубины на пороге, несмотря на то, что опыты отличались друг от друга или средними, или придонными скоростями (см. фиг. 9, *б*, 11, 12 и 13).

На фиг. 26 приводится сопоставление размытого дна для различных режимов по опытам в лотке шириною 1,5 *м*. Удельный расход воды и глубина на водобое были одинаковы.

В случаях неполного гашения энергии потока в пределах водобоя место наибольшего размыва смещается вниз по течению.

Глубина размыва почти в два раза превышает размыв при нормальном режиме. В последнем случае размыв составлял 0,11—0,12 *м*, в условиях же опытов, представленных на фиг. 11, 12 и 13, он увеличивался до 0,25 *м*.

Сравнение скоростей течения на участке наибольшего размыва для опытов с разным распределением скоростей на подходе показывает, что средняя по глубине скорость течения при поверхностном или донном режимах меньше средней скорости при режиме нормальном. Средняя по глубине $\sqrt{\overline{u^2}}$, напротив, меньше при нормальном режиме. В придонной же области скорости близки друг к другу. Во всех случаях в месте

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

наибольшей глубины осредненная придонная скорость близка к нулю. Среднеквадратические значения продольных пульсаций также различаются сравнительно немного (см. фиг. 10, 11 и 12).

Следует отметить, что близкими оказались обратные скорости течения у верховых откосов во всех опытах с ненормальным распределением скоростей в конце водобоя.

На основании сказанного можно предположить, что размыв дна непосредственно за подошвой верхового откоса при разных режимах потока в конце крепления останавливается приблизительно при одних и тех же скоростных характеристиках придонных слоев потока в месте размыва. Повышенная же глубина размыва при сходе с рисбермы не полностью успокоенного потока возникает в соответствии с условиями, которые создаются в яме размыва для гашения пульсаций. Значительные пульсации и ненормальное распределение по глубине осредненных скоростей течения в конце крепления приводят к подмыву крепления и к образованию уступа на границе закрепленной и размываемой частей дна; верховой откос ямы размыва размещается на более низких отметках, чем это имеет место при нормальном режиме течения на водобое. Уступ на дне и пониженное положение верхового откоса создают значительную область, занятую водоворотным течением. Валец уменьшает степень гашения пульсаций в размыве, что приводит к более значительным деформациям дна.

Приемы расчета глубины размыва для случаев не полностью успокоенных потоков в настоящее время не могут быть разработаны вследствие того, что число опытов, из которых можно было бы получить необходимые для этой цели данные, весьма ограниченно. Построение методики расчета возможно, во-первых, на основе предложений Д. И. Кумина [27], С. В. Избаша [9] и И. А. Тер-Аракеляна [10] путем раскрытия связи между глубиной размыва и избыточной энергией на рисберме с учетом дефицита наносов в нижнем бьефе (см. § 2 главы I). Однако для этого необходимо поставить специальные эксперименты с тщательными и надежными измерениями кинематической структуры потока. Рассмотренные выше опыты в лотке шириной 1,50 *м* явственной связи не показали: корректирующий множитель к живой силе в опыте № 4 с учетом пульсации скоростей составлял $\alpha_1=1{,}83$, в опыте № 7 $\alpha_1=1{,}22$. Глубина же размыва в обоих случаях наблюдалась примерно одинаковая (см. фиг. 11 и 12).

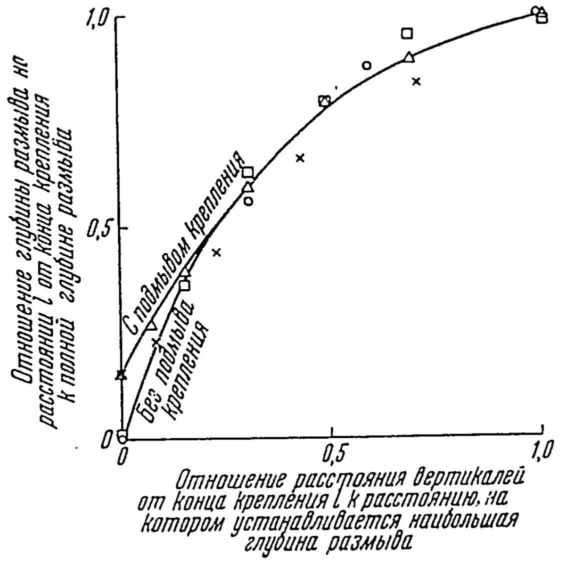
Во-вторых, для расчета глубины размыва можно, по всей вероятности, воспользоваться методом определения осредненных скоростей, изложенным в § 3 главы I. Использование этого метода подсказывается отмеченным ранее фактом прекращения

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

размыва при одних и тех же скоростных характеристиках в придонных слоях потока.

Глубину размыва находят последовательным приближением заранее задаваемых контуров дна. Расчет ведут до тех пор, пока распределение скоростей не будет удовлетворять условиям неразмываемости грунта. Для практической разработки этого приема потребуется накопление экспериментального материала, характеризующего граничные скорости и скоростные гради-



Фиг. 27. Связь относительных глубин размыва с относительными расстояниями от конца крепления:

○ — опыт 2; □ — опыт 3; × — опыт 4; △ — опыт 8

енты в придонной области при стабилизации ямы размыва. С градиентами скорости связаны пульсации скоростей, от величины которых зависит устойчивость частиц грунта на дне.

Подбор очертаний размытого дна облегчается тем, что ямы размыва имеют подобные формы (фиг. 27). Так, расстояние от наиболее глубокого места ямы до конца рисбермы связано с наибольшей глубиной размыва h_p, отсчитываемой от поверхности рисбермы, следующим приближенным соотношением:

$$L = 3{,}5 h_p.$$

Глубины же в промежуточных точках верхового откоса описываются кривой линией $\frac{h_l}{h_p} = f\left(\frac{l}{L}\right)$, представленной на

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

фиг. 27, где h_l — глубина размыва в расстоянии l от конца крепления.

Граничные скорости течения на верховом песчаном откосе при вполне стабилизировавшемся дне с подмытым креплением меняются от 0—0,05 *м/сек* в конце глубокой части русла до 0,08—0,10 *м/сек* в начале верхового откоса.

Градиенты скорости в створе наибольшего размыва в условиях приведенных в настоящей работе опытов составляют приблизительно $1{,}0\ \frac{1}{сек}$.

Методы расчета в условиях отогнанного режима строятся на том, что размыв дна за рисбермой прекращается часто тогда, когда в результате углубления русла уровень нижнего бьефа внезапно надвигается к рисберме (режим переходит в затопленный), закрывая яму размыва. При этом глубина над ямой сразу увеличивается, скорость течения уменьшается, и дальнейший размыв дна становится невозможным.

В этом случае для расчета глубины размыва можно пользоваться формулой М. С. Вызго, приведенной в § 2 главы I, с учетом замечаний, сделанных там же при анализе формулы. Коэффициент к ней, до уточнения, может приниматься такой, какой рекомендован М. С. Вызго.

§ 3. Размыв дна в пространственном потоке

При рассмотрении гидравлических явлений, сопутствующих местному размыву русла за водосбросными сооружениями, указывалось, что пространственный режим нижнего бьефа создается или неравномерным распределением удельных расходов на водосливе или при ширине нижнего бьефа, превышающей длину водослива; к этому же случаю относится и работа водослива неполным фронтом. Неравномерное распределение расходов воды может наблюдаться также при криволинейном очертании в плане отводящего канала. Однако такие случаи, когда искривление канала начинается непосредственно за сооружениями, там, где формируется яма местного размыва, на практике встречаются очень редко.

Пропуск воды частью водосливного фронта приводит к образованию в нижнем бьефе водоворотных зон по бокам транзитного потока.

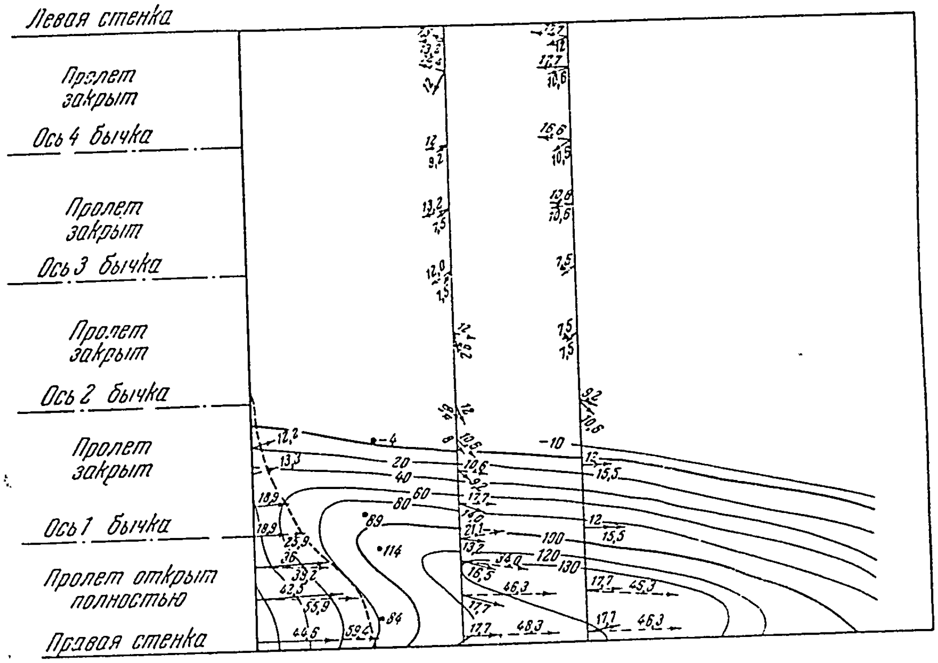
Водоворотные течения в застойных частях нижнего бьефа возбуждаются транзитным потоком в результате водообмена, непрерывно происходящего между транзитным потоком и застойными пазухами. При этом скорости течения в водоворотах всегда оказываются меньше скорости течения, возбудившей водоворотное движение транзитной струи. В соответствии с таким соотношением между скоростями течения транзитной

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

струи и водоворотов максимальный размыв дна устанавливается под транзитным потоком. Влияние же боковых течений, направленных вдоль водосливного фронта, сводится к разрушению, в той или иной мере, верхового откоса ямы размыва.

На фиг. 28 показан план деформации дна при работе одного пролета из пяти по опытам Н. В. Халтуриной [15]. Размыв обнаружился против открытого пролета. В водоворотной зоне



Фиг. 28. Местный размыв за водобоем при частичном открытии водосбросного фронта (данные опытов Н. В. Халтуриной, в лотке шириной 1,50 *м*, Q=0,235 *м³/сек*).

— — — — поверхностные скорости; —→ придонные скорости

размыв отсутствует; на границе с транзитной струей наблюдаются небольшие отложения, помеченные на плане отрицательными числами. Против закрытого пролета, находящегося вблизи действующего, намечается разрушение верхней части откоса. Опыт продолжался недолго и не был доведен до стабилизации; тем не менее он иллюстрирует скоростной режим и характер деформации русла в пространственных условиях.

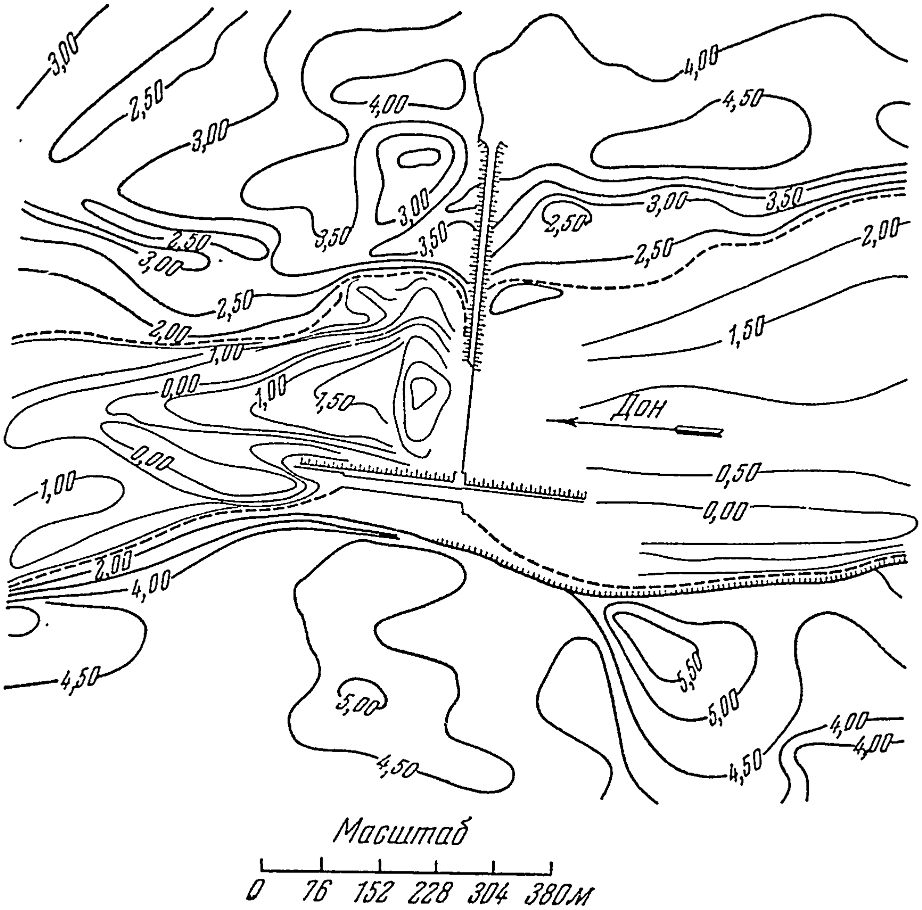
На фиг. 29 показан рельеф дна за Кочетовской плотиной на Дону, сбрасывающей воду в широкий нижний бьеф [28].

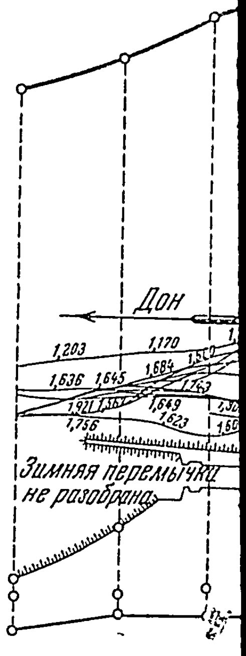
Размыв дна транзитной струей пространственного потока, так же как и в плоском потоке, прекращается тогда, когда

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

а





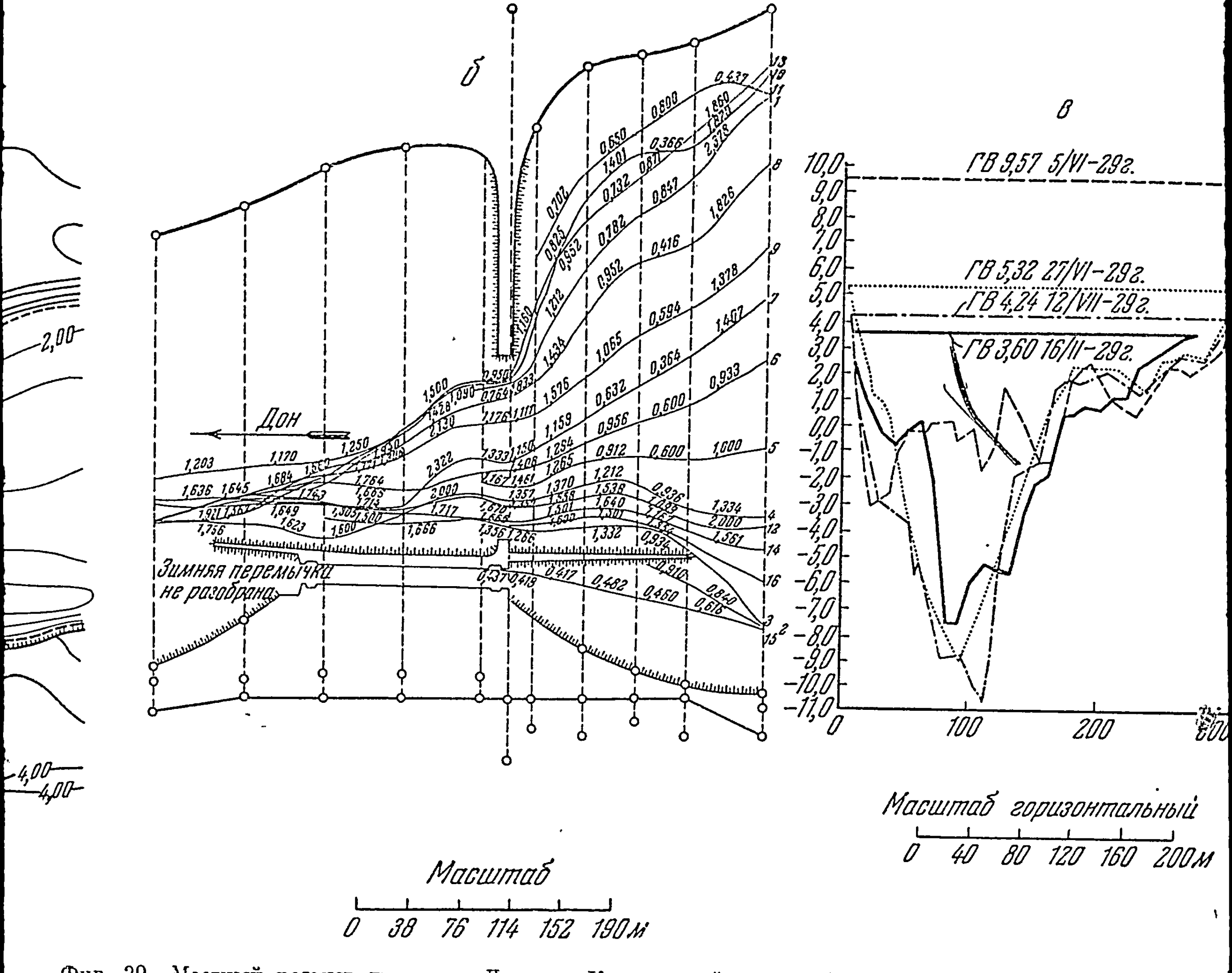
Фиг. 29. Местный размыв

а — план русла в районе плотины; б — скорости течения; в — поперечные профили в нижнем бьефе: —— по пр

н

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

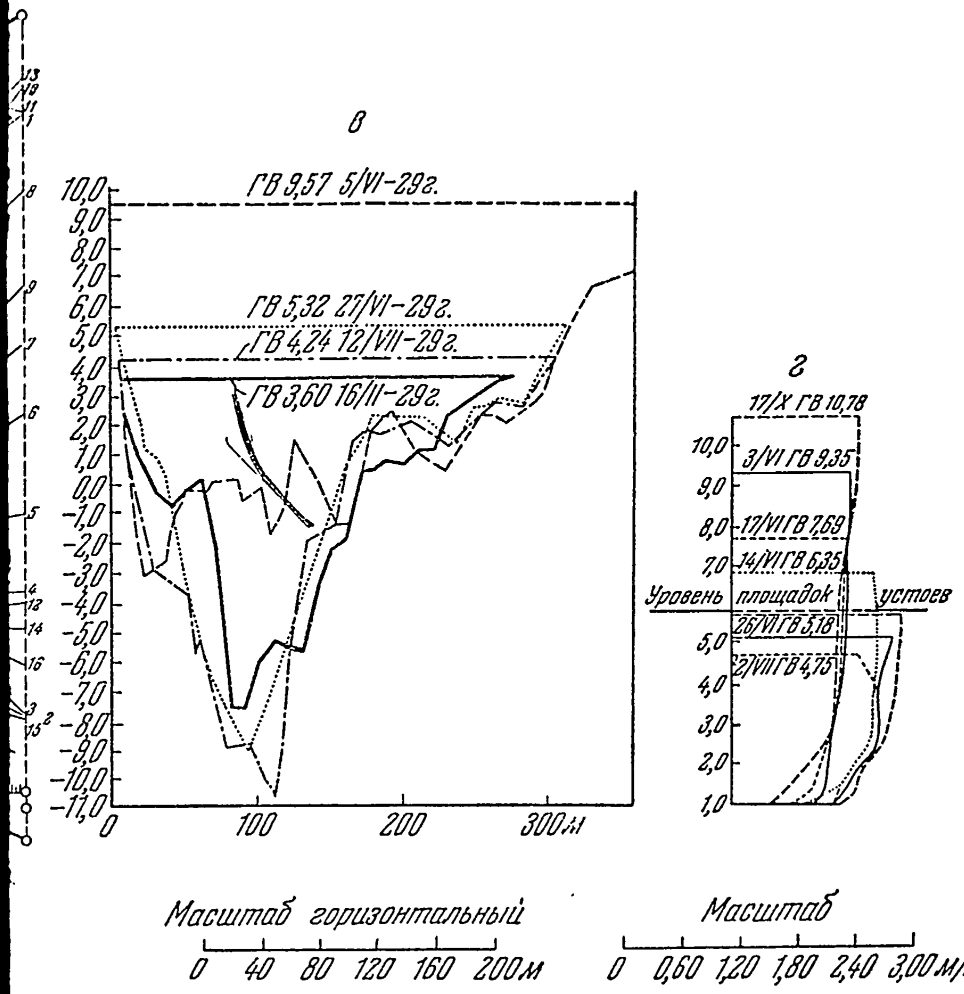


Фиг. 29. Местный размыв дна реки Дона за Кочетовской плотиной:

профили в нижнем бьефе: —— по промерам 18/II; — — — — по промерам 5/VI; . . . . по промерам 27/VI; — . — . — . — . п
в отверстии плотины

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2



плотиной:

VI; . . . . по промерам 27/VI; — . — . — . — . по промерам 12/VII; г — скорости течения

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

скорость течения под влиянием углубления дна приобретает неразмывающие значения. Поэтому глубина потока в месте наибольшего размыва при нормальном режиме на водобое может определяться по равенству (35), если известен удельный расход воды в месте размыва. Последний должен приниматься с учетом возможного увеличения по формулам (5) или (5′).

Совместное решение уравнений (35) и (5) или (5′) дает уравнения для определения наибольшей глубины размыва в пространственных условиях:

$$h=\left\{1{,}05\frac{U_0}{2U_H}\left[\frac{\alpha_0}{\alpha_x}+\frac{1}{2}\frac{B_0}{B}\left(\frac{h_0}{h}-\frac{\alpha_0}{\alpha_x}\right)+\right.\right.$$

$$\left.\left.+\sqrt{\frac{\alpha_0^2}{\alpha_x^2}+2\frac{B_0}{B}\left(\frac{h_0}{h}-\frac{\alpha_0}{\alpha_x}\right)\left[\frac{1}{8}\frac{B_0}{B}\left(\frac{h_0}{h}-\frac{\alpha_0}{\alpha_x}\right)+\frac{1}{2}\frac{\alpha_0}{\alpha_x}+\frac{h_0}{h}\right]}\,\right]\right\}^5, \quad (37)$$

$$h=\left\{1{,}05\left[\frac{U_0}{U_H}\frac{\alpha_0}{\alpha_x}+\frac{B_0}{B}\left(\frac{h_0}{h}-\frac{\alpha_0}{\alpha_x}\right)\right]\right\}^5, \quad (37')$$

где h — глубина воды в месте наибольшего размыва в метрах.

Равенства (37) и (37′) решаются подбором. Полученные соотношения справедливы при постоянной глубине воды по ширине нижнего бьефа и отвечают попеременной работе всех водосбросных отверстий сооружения. В случаях истечения в широкий нижний бьеф глубина воды в застойных зонах должна быть меньше увеличенной размывом глубины транзитной струи. При этом уменьшается сжатие струи и соответственно ограничивается размыв дна. Для приблизительного учета различия в глубинах потока и водоворотных областей можно в равенства (37) и (37′) вместо отношения ширин $\frac{B_0}{B}$ ввести отношения площадей транзитной струи B_0h и всего нижнего бьефа, включая и застойные пазухи, $B_0(h-h_n)+Bh_n$:

$$\frac{B_0h}{B_0(h-h_n)+Bh_n}, \quad (38)$$

где h_n — глубина в застойных зонах.

Для вывода равенств (37) и (37′) была использована формула (35), пригодная в условиях плоского потока для расчета глубины размыва только при нормальном распределении скоростей по глубине. В пространственном потоке равенства (37) и (37′), вероятно, окажутся действительными также и для некоторых случаев поверхностного и донного режимов. Сравнивая распределение скоростей по глубине в потоке с внезапным расширением (см. фиг. 4) и соответствующее распределе-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

ние скоростей в плоском лотке (см. фиг. 17 и 18), легко убедиться в том, что при наличии водоворотной области длина вальца за уступом дна резко сокращается, а обратные скорости течения в вальце почти не улавливаются измерительными приборами. Это факт, отмеченный во всех проведенных нами опытах, указывает на ослабление вальцов под струей в пространственном потоке. Вместе с этим должны улучшиться и условия гашения избыточной энергии потока в яме размыва.

Изложенный метод расчета относится к работе водослива неполным фронтом. Если вода сбрасывается через все отверстия водослива, но открытые неодинаково, то глубину размыва можно определять, используя уравнение (9), приведенное в § 2 главы II.

Имея в виду, что после завершения размыва скорость течения должна удовлетворять равенству:

$$U = U_{H} h^{0,2},$$

уравнение (9) может быть переписано в следующем виде:

$$h = \left(\frac{1}{U_{H}} \sqrt{\frac{\alpha_0' U_0^2 - \alpha_{01}' U_{01}^2 + \alpha' \frac{Q^2}{h_1^2 B_1^2}}{\alpha'}} \right)^5, \qquad (39)$$

где h — глубина наибольшего размыва под струей, несущей большой удельный расход.

Равенство (39) решается подбором. При этом необходимо учитывать возможность отрыва потока от берегов. В последнем случае, в соответствии с замечаниями, сделанными в § 2 главы II к уравнению (9), расчет глубины размыва производится по (37) и (37').

Приемлемость полученных в настоящем параграфе зависимостей для практических расчетов может быть показана на примере одной из существующих плотин, размыв за которой углубился в плотные глины (фиг. 30 и 31).

Половодья пропускались через два пролета из семи. Удельный расход воды на рисберме составлял 19 $м^3/сек$. Глубина воды против действующих пролетов после размыва дна достигла 20 $м$. При этом глубина в застойной пазухе была 10 $м$. Глубина на рисберме — около 7 $м$.

Определим неразмывающую скорость для глин, в которых остановился размыв, по зависимостям (35), (5) и (38).

По равенству (38)

$$\frac{B_0 h}{B_0 (h - h_{п}) + B h_{п}} = \frac{2 \cdot 20}{2 \cdot 10 + 7 \cdot 10} = 0,45.$$

Полагая $\frac{\alpha_0}{\alpha} = 1,00$ при $\frac{h}{h_0} = 2,86$, по (5) находим: $\frac{q}{q_0} = 2,25$.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

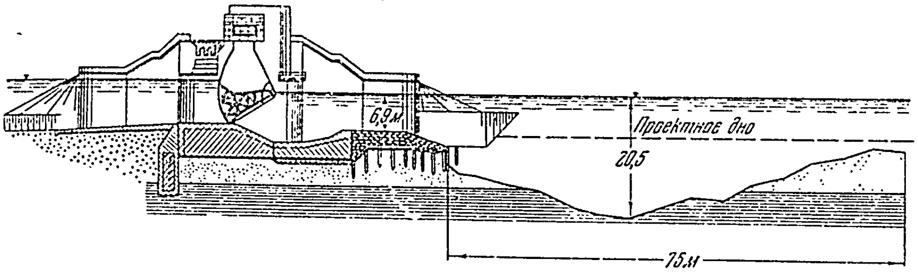
Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Отсюда удельный расход воды в месте наибольшего размыва должен быть

$$q = 43 \text{ м}^2/\text{сек}.$$

Пользуясь равенством (35), находим величину неразмывающей скорости, отнесенную к глубине 1 *м*, равной:

$$U_н = 1{,}22 \text{ м/сек}.$$



Фиг. 30. Продольный профиль местного размыва в плотных глинах

В нормах на проектирование гидротехнических сооружений эта величина для плотных глин дается равной 1,20 *м/сек*, а для очень плотных 1,65 *м/сек*. Полученный расчетом результат хорошо согласуется с приведенными величинами.

§ 4. Учет отмостки

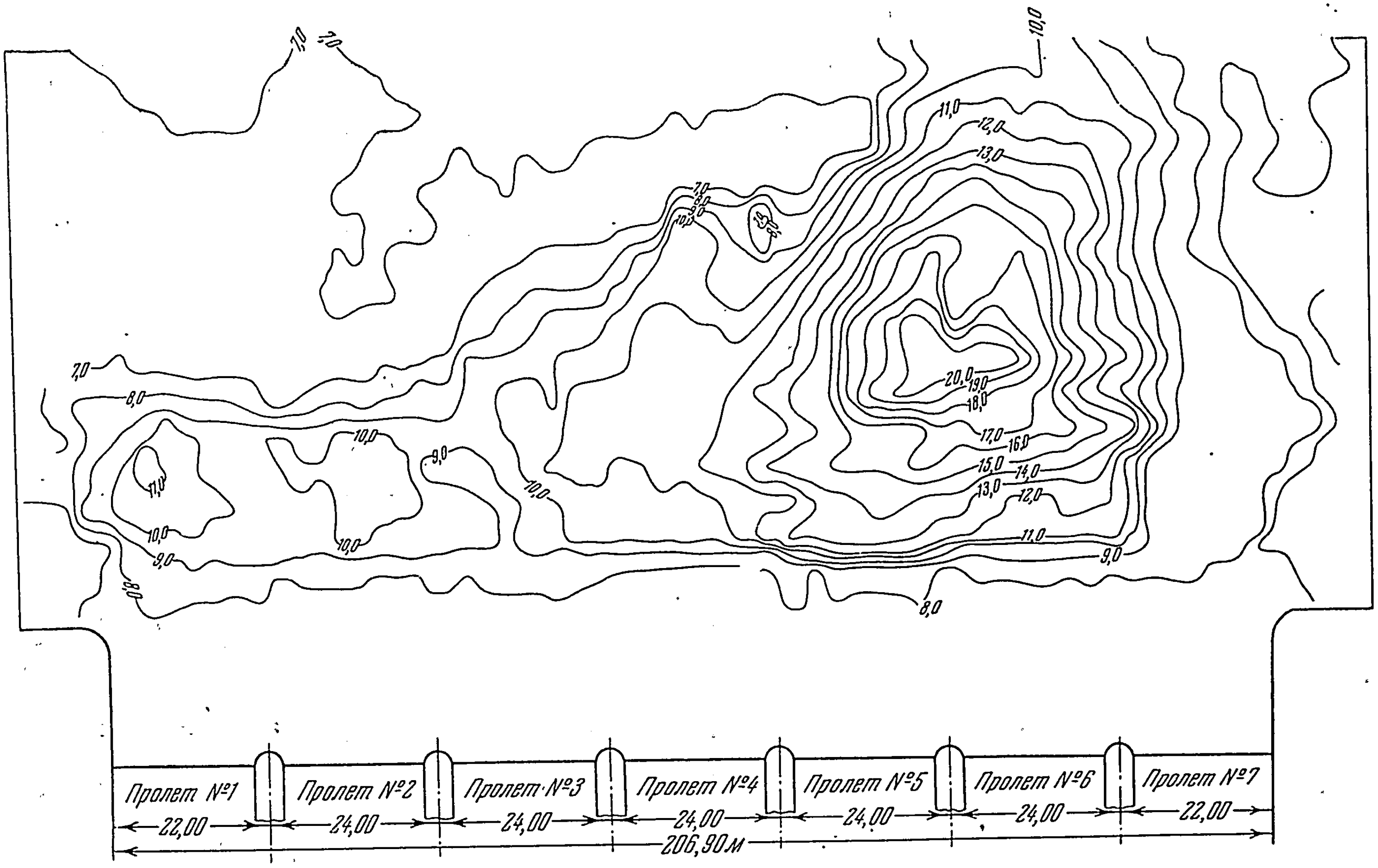
В процессе размыва неоднородного грунта происходит вымыв мелких частиц и оседание на дно более крупных. Скопление крупных частиц на поверхности дна, образуя как бы защитный слой, увеличивает сопротивляемость русла эрозионному действию потока. Образование такого защитного слоя носит название самоотмостки.

Отмостку дна удобно наблюдать при размыве мелкозернистого песка, содержащего включения из гравия или гальки. Резкое отличие крупности включений от основной массы грунта позволяет легко обнаружить границу осевшего защитного слоя. На реках, где такого рода отмостка образуется очень часто в ходе естественных деформаций русла, можно видеть, как под хорошо расщебененным сплошным галечным слоем толщиной в один камень залегает песчаная толща значительной мощности.

Отмостка может образоваться не только из гальки или гравия, но и из крупного песка. Во всех этих случаях неразмывающая дно скорость оказывается выше неразмывающей скорости основной, более мелкой массы грунта, выделившего из своего состава защитный слой.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2



Фиг. 31. План размытого дна за плотиной, показанной на фиг. 30

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

При анализе местного размыва в нижнем бьефе плотин в случае, если дно реки сложено неоднородными грунтами, желательно учитывать повышение неразмывающей скорости, так как при правильном решении концевой части крепления нижнего бьефа это позволяет увеличивать удельные расходы на водосливе и соответственно сокращать длину водосливного фронта.

Образование отмостки в яме местного размыва имеет свою специфику. Изучение этого явления в лабораторных условиях показало, что особенности течений, свойственные местному размыву, оказывают влияние и на процесс отмащивания.

Опыты над образованием отмостки в местном размыве за закрепленным участком дна велись под руководством автора в малом лотке гидравлической лаборатории МИСИ имени В. В. Куйбышева. Размеры лотка приведены в § 4 главы II. Размываемая часть дна формировалась из песка с преобладающим размером зерен 0,5 *мм*. В песок добавлялось 30% крупного гравия с диаметром частиц от 5 до 10 *мм*. Грунт тщательно перемешивался. Неразмывающая скорость при глубине потока 1 *м* равна для песка 0,43 *м/сек*, а для гравия — 0,80—1,0 *м/сек*. К месту размыва подходил равномерный поток глубиной 0,075 *м* со средней скоростью 0,72 *м/сек*. Опыт продолжался 114 часов. Дно после размыва подошло к стабильному состоянию (фиг. 32).

В нижней части лотка в результате образования отмостки размыв быстро прекратился. Понижение дна составило 0,02—0,025 *м*. Непосредственно за креплением, несмотря на то, что содержание крупного материала в песке было таким же, как и в нижней части лотка, размыв наблюдался в течение всего опыта; дно опустилось на значительную глубину. За креплением сформировался откос, спускающийся к месту наибольшего размыва.

Если проверить глубину размыва по равенству (35), то можно убедиться, что размыв остановился на глубине, соответствующей песчаному грунту, не содержащему материала для отмостки. Действительно, при $u_1 = 0{,}43$ и $q = 0{,}054$ $м^2/сек$ по (35) глубина в месте наибольшего размыва должна быть равной 0,18 *м*. По опыту глубина оказалась близкой к расчетной — 0,17 *м*.

Проведенное сопоставление ясно показывает, что непосредственно за креплением частицы гравия не защитили дно от размыва, хотя дно в месте переуглубления все время было покрыто слоем крупных частиц.

Полученный результат объясняется следующим.

В нижней части лотка за ямой переуглубления отмостка формировалась под действием хотя и пульсирующих, но по-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

стоянно направленных в одну сторону скоростей. В таких условиях, как было отчетливо видно в открытом лотке, отмостка ложилась в один слой подобно чешуе. Передний край каждой частицы прикрывался соседней частицей, расположенной выше по течению. Таким образом, частицы гравия предохраняли друг друга от воздействия течения: получался плотный слой отмостки с повышенной устойчивостью частиц.

В месте переуглубления дна за верховым откосом ямы размыва, согласно изложенному в § 3 главы II и в § 2 настоящей главы, частицы гравия, находясь под действием только переменных по знаку пульсационных скоростей (так как осредненная скорость у дна за откосом близка к нулю), непрерывно распатываются. Вследствие распатывания частиц отмостка не приобретает чешуйчатого строения, повышающего ее устойчивость. В лотке можно видеть, как отдельные зерна гравия, не образуя на дне плотного слоя, все время колеблются. В отдельные, правда сравнительно редкие, моменты, когда мгновенная скорость резко увеличивается, распатанные частицы выбрасываются на низовой откос и далее катятся по слою отмостки, пока не попадут в случайное углубление дна или не проследуют до конца лотка.

Песок, обнажившийся на месте выброшенной частицы, легко размывается до тех пор, пока вновь не обнаружится следующее зерно гравия, лежавшее до этого времени в толще песка. Пополнившийся слой отмостки сохраняется на поверхности песка до следующего скоростного толчка, способного удалить наименее устойчивую, распатанную частицу гравия.

В таких условиях граница углубления дна определяется, очевидно, не только сопротивлением гравийного слоя, сколько устойчивостью песчаной толщи.

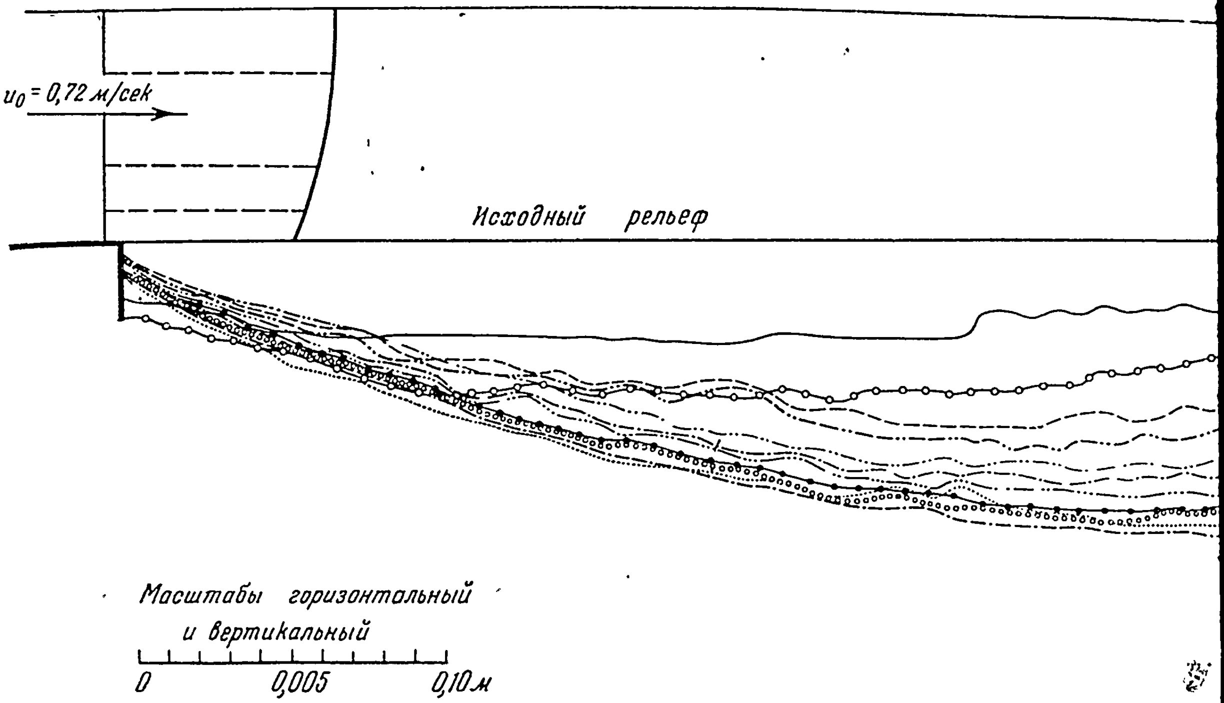
Результаты рассмотренного здесь опыта позволяют прийти к выводу, что учет отмостки при определении глубины местного размыва возможен только тогда, когда в проекте крепления дна за водобоем предусматривается предварительное крепление верхового откоса и главным образом его подошвы, исключающие распатывание частиц. Крепление подошвы откоса должно располагаться на уровне размытого дна за пределами местного переуглубления. Такое крепление может быть выполнено с помощью ковша, устраиваемого в конце рисбермы (см. § 5).

Расчет глубины размыва с учетом отмостки может быть произведен только при наличии подробных данных о составе грунта.

Глубина размыва при наличии в грунте материала для отмостки зависит от крупности этого материала и от процента его содержания.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

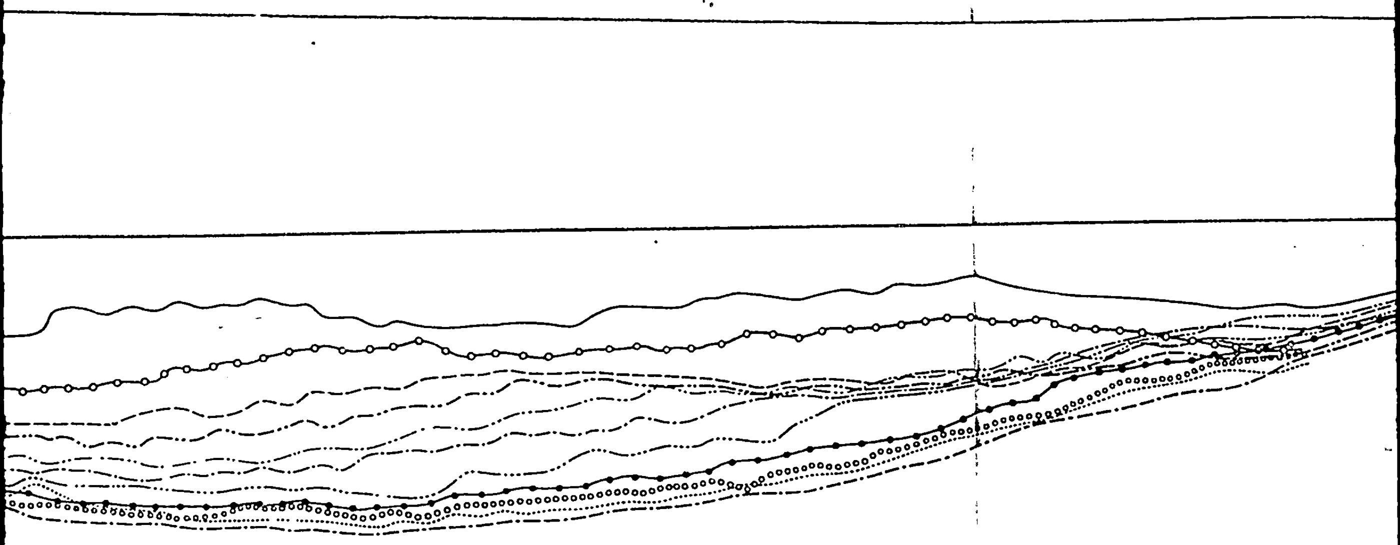
Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2



Фиг. 32. Размыв дна в песочном грунте с вклю
—— продолжительность 6,5 час.; — — — продолжительность 22,5

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

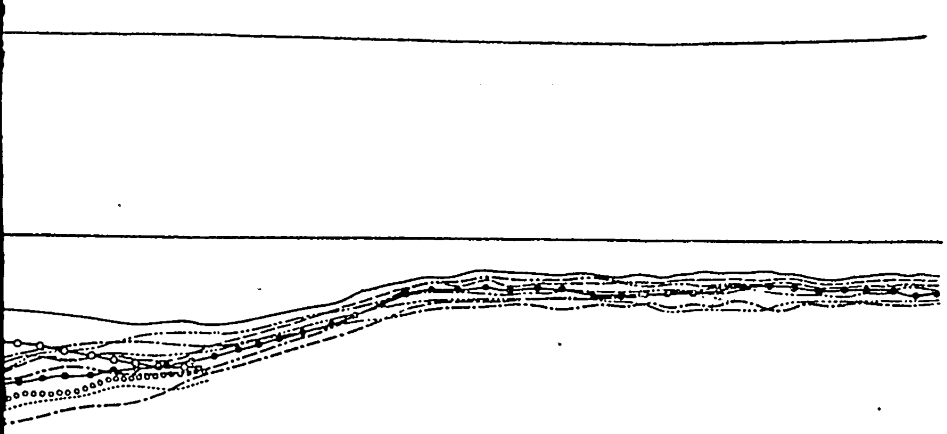


сочном грунте с включением 30% гравия в плоском лотке шириной 0,315 *м*; $Q = 0{,}017$ *м³/сек*; $d_{\text{песка}} = 0{,}5$

— продолжительность 22,5 час.; —.—.— продолжительность 40 час.; —●—●—●—●—●— продолжительность 70 час.; — —.. ——..—

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2



7 $м^3/сек$; $d_{песка}=0,5$ *мм.* $d_{гравия}=5—10$ *мм:*
ть 70 час.; — —.. ——..——.. продолжительность 114 час.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Если в начале размыва скорости течения воды достаточно велики, то крупные включения уносятся течением так же, как и основная масса грунта. Образование отмостки начинается только с того момента, когда скорости в процессе углубления русла уменьшаются до величин, не размывающих материал отмостки.

Уровень дна, при котором вследствие уменьшения скоростей прекращается унос отмостки, можно назвать горизонтом смыва отмостки. Достигнув этого горизонта, дно продолжает углубляться, пока не закончится процесс накопления отмостки в количествах, достаточных для покрытия всей площади дна крупным материалом. Слой грунта, заключенный между горизонтом смыва и конечным положением размытого, покрытого отмосткой дна, следует называть слоем накопления отмостки.

Полная глубина потока после завершения размыва дна будет равна

$$h = h_c + h_н,$$

где h_c — означает глубину воды над горизонтом смыва и
$h_н$ — мощность слоя накопления отмостки.

Положение горизонта смыва может быть определено по равенству

$$h_c = \sqrt[1,2]{\frac{q}{U_Н}},$$

в котором $U_Н$ устанавливается по крупности отмащивающих включений.

Мощность слоя накопления будет тем больше, чем толще слой образующейся отмостки и чем меньше содержание в грунте крупного материала:

$$h_н = \frac{\Delta}{n},$$

где Δ — толщина слоя отмостки;
n — относительное содержание крупных включений по объему.

Соответственно, полная глубина размыва определится следующим выражением:

$$h = \sqrt[1,2]{\frac{q}{U_Н}} + \frac{\Delta}{n}. \qquad (40)$$

Величины $U_Н$ и n устанавливаются по данным геологических обследований. Что касается толщины слоя отмостки, то для его определения пока нет достаточного опытного материала. Наблюдения автора за естественной отмосткой на реках дают

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

основание считать, что отмостка ложится на защищаемый грунт в один слой. К тому же заключению приводит описанный выше опыт в малом лотке МИСИ. Однако эти наблюдения относятся к отмостке из более или менее крупного материала — гравия или гальки. Как образуется отмостка из крупного песка, установить пока не удалось. Учитывая еще недостаточный опыт в расчетах отмостки, в практических случаях приходится назначать толщину ее с некоторым запасом, равной нескольким диаметрам отмащивающих частиц. Для простоты, впредь до постановки специальных опытов, можно рекомендовать при крупном песке, гравии и гальке принимать толщину отмостки в 0,20 *м*.

Определение глубины размыва в мелких грунтах, содержащих резко отличные по крупности включения, способные образовать отмостку, производится непосредственно по равенству (40). На практике же часто приходится иметь дело с неоднородными грунтами, состоящими из целой гаммы разнообразных по крупности частиц. Так как содержание частиц той или иной крупности неодинаково, то заранее нельзя сказать, какие частицы войдут в состав отмостки. В этом случае при определении возможной глубины размыва в качестве состава отмостки принимают частицы всех имеющихся крупностей по порядку. Содержание в грунте отмащивающего материала считается по относительному содержанию всех фракций крупнее частиц, принятых в качестве отмащивающих. Из полученного таким образом ряда глубин размыва выбирается наименьшая. Пример расчета показан в табл. 5. Пример сделан для удельного расхода воды $q = 35$ *м²/сек* при толщине отмостки $\Delta = 0,20$ *м*.

Наименьшая глубина воды получалась равной 32,0 *м*. Принято, что на этой глубине размыв дна прекращается.

§ 5. Работа ковша

Ковши устраиваются в конце крепления для предохранения рисбермы от подмыва. Верховому откосу ковша из условия безотрывного течения воды придается обычно уклон 1 : 4 (фиг. 33, *а*). Откос и его подошва закрепляются; горизонтальная часть (дно) ковша покрывается слоем камня, предназначенным для того, чтобы прикрыть откос размыва, если размыв распространится ниже дна ковша. Поскольку ковш рассматривается только как предохранительное устройство, постольку обычно выдвигается требование полного гашения избыточной энергии потока еще до входа в ковш, т. е. в пределах горизонтальных частей крепления.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Таблица 5

Условия размыва	Диаметр частиц d (*мм*)						
	>10	>5	>2	>1	>0,5	>0,25	<0,25
Относительное содержание частиц	0,006	0,023	0,045	0,078	0,40	0,56	0,44
Неразмывающая скорость при глубине 1 *м* U_H, *м/сек*	1,00	0,80	0,65	0,60	0,50	0,35	—
Глубина воды над горизонтом смыва $h_c = \sqrt[1,2]{\frac{q}{U_H}}$	19,30	24,0	28,2	29,4	34,4	46,2	—
Мощность слоя накопления отмостки $h_н = \frac{\Delta}{n}$, *м*	33,0	8,7	4,5	2,6	0,5	0,4	—
Полная глубина размыва $h = h_c + h_н$, *м*	52,3	32,7	32,7	32,0	34,9	46,6	—

Ниже будет показано, что такое требование вызывается излишней осторожностью: при правильном выборе глубины и размеров ковша им можно воспользоваться как гасителем некоторой части избыточной энергии в потоке и, вследствие этого, допустить неполное выравнивание потока до поступления его в ковш.

В параграфе 4 главы II было показано, что увеличение пульсации скорости в яме размыва, а следовательно, и в ковше происходит только в тех случаях, когда к яме размыва поток подходит уже в значительной степени успокоенный. Напротив, при неполном гашении избыточной энергии, характеризующемся распределением осредненных скоростей течения, отличным от распределения скоростей в равномерном потоке, а также повышенной по сравнению с ним пульсацией скоростей, в яме размыва происходит уменьшение пульсации. Это явление свидетельствует о возможности работы ковша как гасителя.

Кроме того, при поверхностном и донном режимах течений в месте сбега потока с рисбермы, т. е. как раз в случаях размыва дна не полностью успокоенным потоком без устройства ковша наблюдается подмыв закрепленной части русла (см. фиг. 11 и 12) и вследствие этого образование у верхового откоса ямы размыва обширной вальцовой области (см. § 3 главы II), наличие которой ухудшает условия гашения возмущений в потоке.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Сооружение ковша с закрепленным верховым откосом рационального очертания может улучшить гашение пульсаций. Закрепление откоса исключает подмыв крепления и образование за ним уступа. Если при этом откосу придается форма, вырабатываемая потоком в условиях его полного успокоения на рисберме, или просто достаточная пологость, то вальцовая область в яме размыва может быть значительно сокращена. Сравнение распределения скоростей течения в размытом русле при заранее закрепленном верховом откосе (см. фиг. 34 и 11) с распределением скоростей для того же поверхностного режима в случае свободного формирования верхней части ямы размыва показывает, что крепление откоса почти исключает вальцовую область.

Вследствие сокращения вальцовой области закрепление откоса способствует выравниванию осредненных скоростей на относительно коротком участке, а также способствует лучшему гашению пульсаций. Затухание пульсаций происходит вместе с выравниванием скоростей и на горизонтальном участке ковша.

Сопоставление величин пульсационных скоростей в опытах с уступом дна и в опытах с моделью ковша, приведенное в § 4 главы II, показывает, что в последнем случае пульсация придонных скоростей оказалась в полтора раза меньше, чем за уступом при тех же средних скоростях и отношениях глубины на рисберме к глубине за уступом (см. табл. 4).

Гашение избыточной энергии потока в ковше может быть прослежено по тому влиянию, которое оказывает ковш на глубину размыва. Для этой цели было поставлено наблюдение за размывом дна при заранее закрепленном откосе ниже рисбермы заложением 1 : 4 при поверхностном режиме. Условия опыта были такие же, как в опыте № 4 (см. фиг. 11). Закрепленный откос перед началом размыва засыпался песком под один уровень с водобоем.

Результаты опыта показаны на фиг. 34. Глубина размыва при закрепленном откосе оказалась значительно меньше, чем в аналогичном опыте № 4 и составила всего 17 *см* против 25 *см*. На фиг. 35 приведено сопоставление скорости нарастания глубины размыва для тех же опытов. Ход кривых увеличения глубины размыва хорошо иллюстрирует резкое снижение скорости деформации дна в результате закрепления откоса. На этой же фиг. 35 совмещены продольные профили ямы местного размыва в случае полного успокоения потока в конце крепления и в случае поверхностного режима, при закрепленном верховом откосе ямы и при свободном формировании откоса (без крепления). Профиль при закрепленном откосе занял среднее положение и находится ближе к более мелкому профилю размыва, соответствующему полностью успокоенному

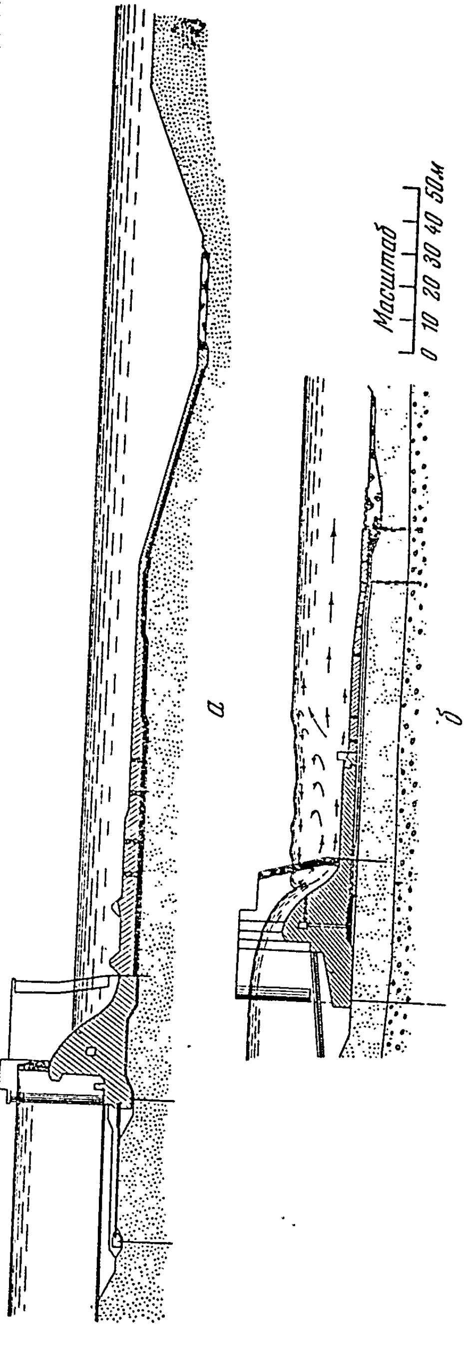
Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

потоку, нежели к более глубокому профилю, сформированному при том же поверхностном гидравлическом режиме, что и опыт с закрепленным откосом.

Наличие в ковше горизонтального закрепленного участка на нижней отметке должно иметь следствием дальнейшее уменьшение глубины размыва, так как в пределах горизонтального участка поток, сходящий с откоса, будет продолжать выравниваться. При этом происходит гашение той части оставшейся избыточной энергии воды, которая не может быть погашена на откосе в условиях углубляющегося потока.

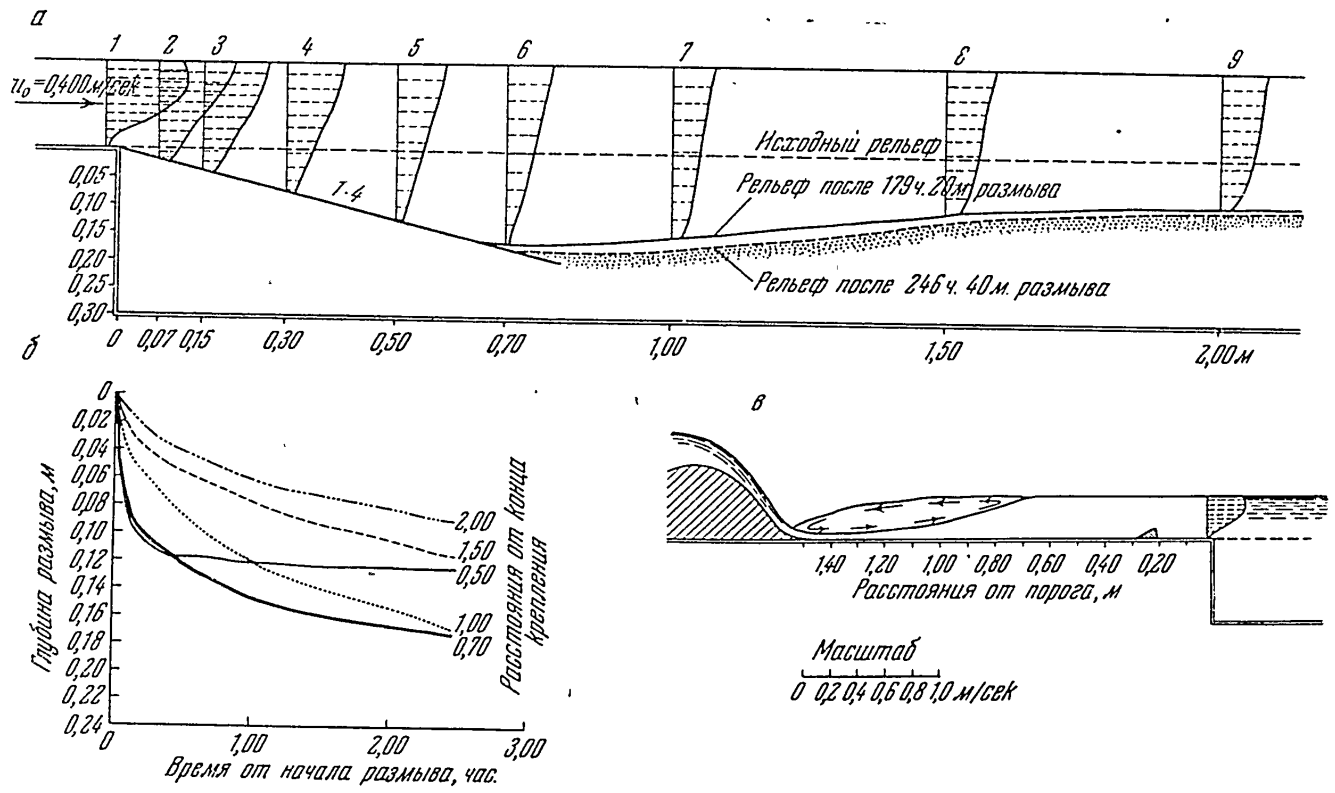
Если длина горизонтального крепления достаточна для успокоения поступающего в ковш потока, то размыв может быть уменьшен до глубины, близкой к глубине размыва, отвечающей полному гашению избыточной энергии в пределах водобоя и рисбермы. На фиг. 36,*а* приводится сопоставление скоростей течения для поверхностного режима в условиях закрепленного откоса и дна реки со скоростями при нормальном



Фиг. 33. Конструкции концевых частей рисбермы:
а — ковш; *б* — ячеистая шпунтовая стенка с каменнонабросной призмой

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

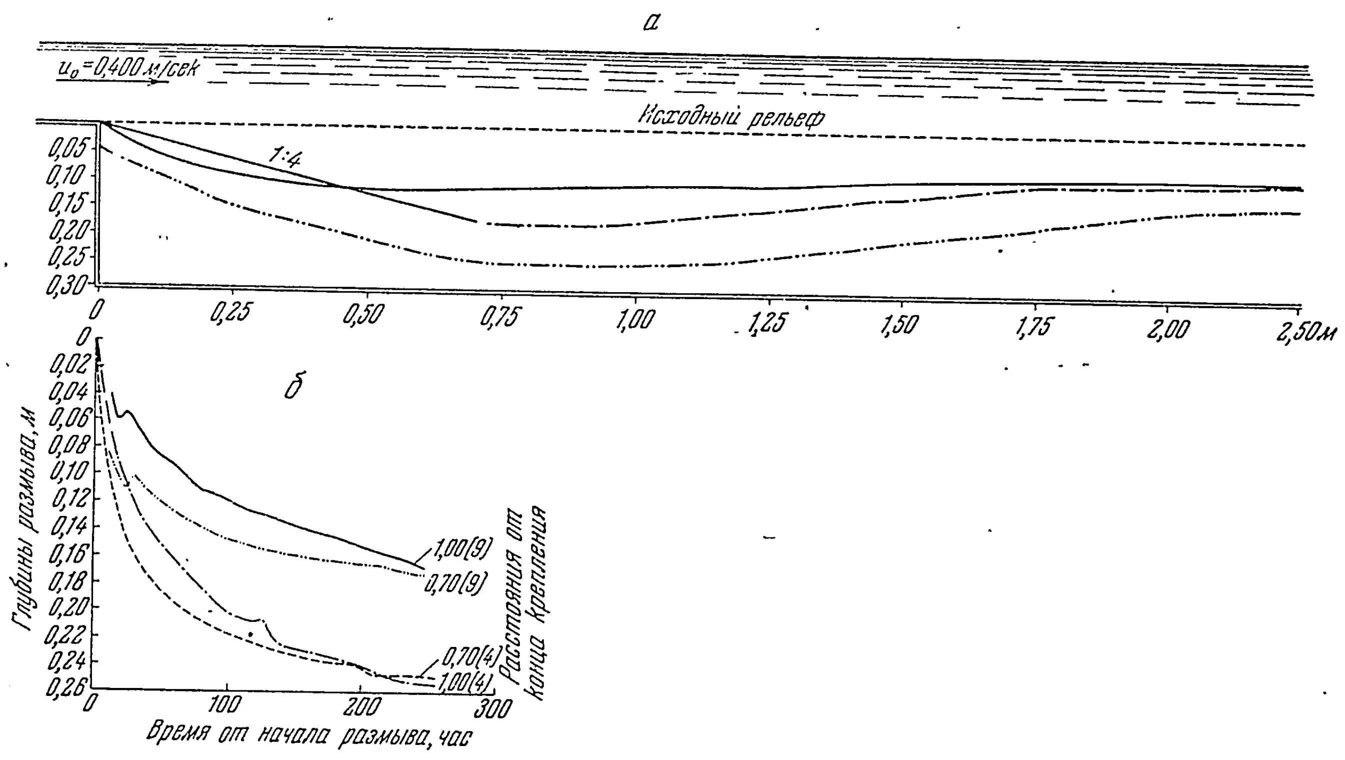


Фиг. 34. Размывы дна за водобоем при закрепленном верховом откосе по опытам в лотке шириной 1,50 *м*; Q=0,090 *м³/сек*. Режим скоростей в конце крепления поверхностный:

а — профиль размыва и осредненные скорости; *б* — ход размыва; *в* — схема установки

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

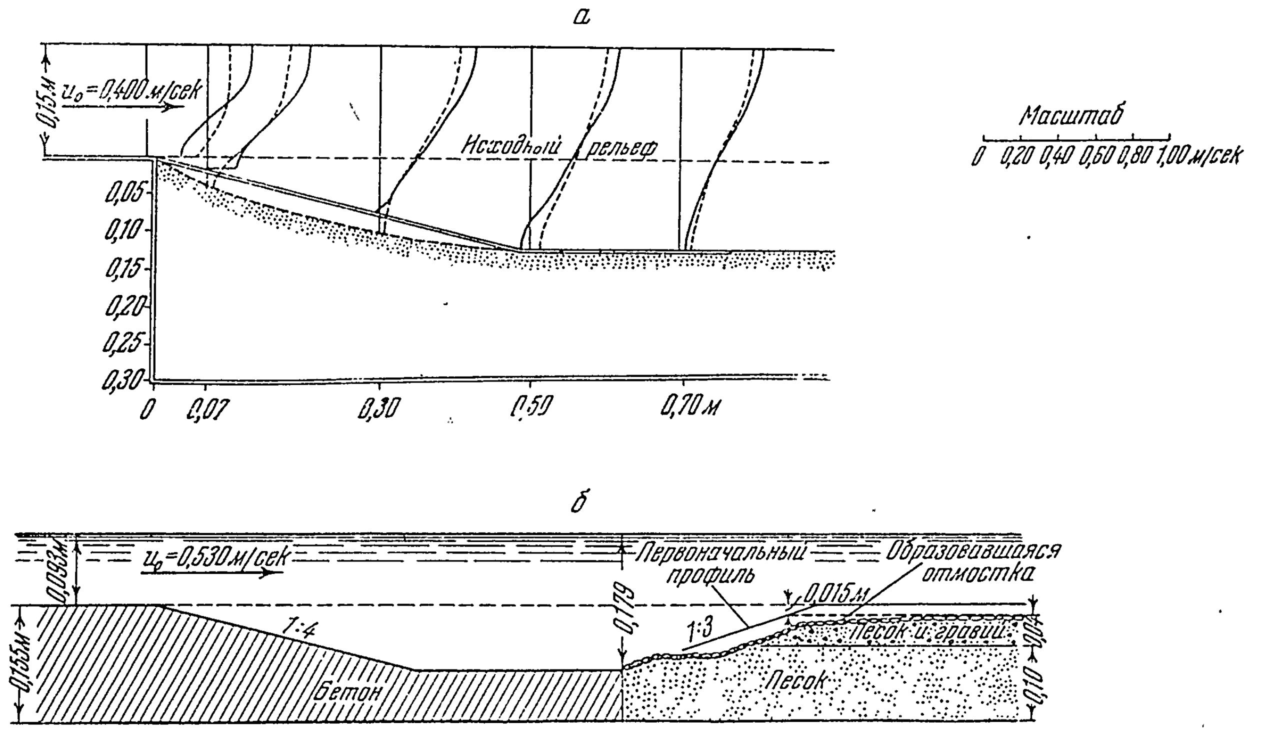


Фиг. 35. Совмещенные продольные профили размыва при закрепленном верховом откосе и при свободном формировании ямы размыва:

—— опыт 6 продолжительностью 199 час. с нормальным режимом скоростей в конце крепления (см. фиг. 10) — .. — .. — опыт 4 продолжительностью 256 час. с поверхностным режимом (см. фиг. 11); — · — · — · опыт 9 продолжительностью 246 час. с поверхностным режимом при закрепленном верховом откосе ямы размыва (см. фиг. 34); б — ход размыва в опытах 4 и 9

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2



Фиг. 36.

а — сопоставление скоростей течения в ковше при поверхностном режиме со скоростями течения в яме размыва при нормальном распределении скоростей в конце крепления; *б* — образование отмостки при размыве дна ниже ковша в лотке шириной 0,315 *м*; Q=0,0148 *м³/сек*; ——— эпюры скоростей в ковше при поверхностном режиме; — — — эпюры скоростей в яме размыва при нормальном режиме в конце крепления

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

режиме. В обоих случаях скорости в конце крепления близки друг к другу.

Таким образом, при устройстве ковша нет надобности полностью успокаивать поток на горизонтальных участках крепления до ковша, так как ковш частично принимает на себя функции гасителя. При некотором избытке кинетической энергии потока в конце рисбермы размыв нижнего бьефа за ковшом не превосходит глубины размыва, соответствующей полностью успокоенному потоку.

Допустимая по условиям размыва степень гашения энергии перед ковшом должна быть установлена специальными исследованиями. На основании приведенных выше опытов и расчетов, выполненных методами, которые были изложены в § 3 главы II, можно прийти к выводу, что допустимая степень гашения зависит от размеров и формы ковша. При отношении глубины воды в ковше h к глубине на рисберме $h_р$, равном $\frac{h}{h_р} \approx 2$, при заложении верхового откоса 1 : 4 и длине закрепленного горизонтального участка ковша $l_к = 1{,}5h - 2{,}0h$ можно допустить в конце рисбермы поверхностный или донный режим скоростей с величиной корректирующего множителя, определенного по осредненным скоростям, равной

$$\alpha = \frac{\frac{1}{h_р}\int\limits_0^{h_р} \bar{u}^3 dh}{U^3} \approx 1{,}35.$$

При меньших соотношениях $\frac{h}{h_р}$ можно допустить больший избыток непогашенной энергии. Напротив, с увеличением $\frac{h}{h_р}$ нужно или добиваться повышения степени успокоения потока, или делать верховой откос более пологим и удлинять горизонтальное крепление за ним.

Все выводы, относящиеся к работе ковша, получены для плоского потока. Они остаются справедливыми и для пространственного режима, так как возможный в этом случае размыв верхового откоса, ухудшающий гидравлический режим в яме размыва, исключается креплением откоса. При закрепленном же откосе вальцовая область в пространственном потоке оказывается менее обширной по сравнению с плоским потоком, вследствие чего в пространственных условиях гашение пульсации должно происходить интенсивнее.

Устройство ковша полезно также в тех случаях, когда в размываемых грунтах содержатся крупные частицы, способные

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

образовать отмостку дна. В предыдущем параграфе было показано, что при некоторых соотношениях между скоростями течения и крупностью включений в яме размыва у подошвы откоса образование отмостки затрудняется в результате расшатывания зерен крупного материала пульсационными скоростями различного направления. Ниже, где на дно действует хотя и пульсирующая, но постоянно направленная скорость, отмостка ложится нормально, ограничивая размыв на меньших глубинах. При устройстве ковша зона расшатывания отмостки оказывается закрытой креплением дна ковша. Ниже крепления придонные скорости потока имеют постоянное направление, не препятствующее образованию отмостки. Закрывая зону расшатывания, ковш предохраняет русло от переуглубления за подошвою откоса.

Неравномерное распределение крупных частиц в грунте может привести к ограничению размыва на разных отметках. В таких случаях дно ковша приходится закладывать на пониженные места размытого дна; на участках же с меньшей глубиной размыва ковшом приходится прорезать горизонт отмостки. Размещение дна ковша ниже горизонта отмостки не ухудшает условий размыва. Крупные частицы по мере размыва спускаются к нижнему концу крепления и прикрывают образующийся обратный откос, сопрягающий дно ковша с поверхностью размытого дна (см. фиг. 36, *б*).

Кроме устройства ковша, в практике крупного гидротехнического строительства в СССР применяется также решение концевой части рисбермы, предложенное П. П. Лаупманом [29]. Решение это заключается в том, что в конце рисбермы устраивается глубокий зуб ячеистой конструкции из металлического шпунта.

Для надежного предохранения сооружения от подмыва такая конструкция требует достаточного заглубления ячеистого зуба. В случае неполного гашения энергии потока к концу рисбермы, особенно в пространственных условиях, когда возможно значительное разрушение верхового откоса ямы размыва, трудно устраивать необходимое заглубление зуба. Чтобы предохранить верховой откос от подмыва и этим обеспечить устойчивость зуба, в последнее время стали предусматривать устройство за рисбермой, ниже зуба, каменнонабросной призмы с шлейфом (см. фиг. 35, *б*). Предполагается, что каменная наброска, опускаясь в процессе формирования ямы местного размыва, должна прикрывать ее верховой откос. Укладка каменнонабросной призмы повышает надежность рассматриваемой конструкции, однако фиксация откоса за рисбермой в этом случае менее определенна, чем при устройстве ковша, так как вместо заранее сделанного и искусственно

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

закрепленного откоса, формирование и крепление его предоставляются самому потоку.

Замена ковша ячеистым зубом ухудшает и условия образования отмостки. Подошва образующегося откоса в этом случае остается без крепления, и расшатывание отмостки должно происходить беспрепятственно. Поэтому, оканчивая рисберму зубом с устройством каменнонабросной призмы или без нее, можно учитывать ограничение глубины размыва естественной отмосткой только в том случае, когда в грунте содержатся очень крупные включения, не поддающиеся расшатыванию.

Из сказанного следует, что сооружение ковша за рисбермой по сравнению с ячеистой шпунтовой стенкой надежнее закрепляет верховой откос будущего размыва и этим предохраняет дно от излишних переуглублений. При наличии в легкоразмываемом грунте крупных включений ковш, исключая расшатывание крупных зерен, способствует ограничению глубины размыва естественной отмосткой дна при любых диаметрах отмащивающего материала.

Указанные преимущества не всегда имеют значение при решении концевой части рисбермы. Так, например, при наличии под песчаной толщей на небольшой глубине слaбоподдающихся размыву слоев грунта размеры разрыва могут оказаться одинаковыми как при устройстве ковша, так и при сооружении ячеистого зуба. В подобных случаях выбор конструкции должен основываться на экономических соображениях и на оценке условий производства работ.

ВЫВОДЫ

1. К числу наименее изученных вопросов гидравлики местного размыва относится отмеченное в лабораторных условиях увеличение удельных расходов воды в нижнем бьефе по сравнению с расходами на водосливе при сбросах воды узким водосливным фронтом в широкий нижний бьеф или при неравномерном распределении удельных расходов на водосливе.

Проведенные автором лабораторные и аналитические исследования показали, что увеличение удельных расходов в нижнем бьефе происходит только там, где истечение узким фронтом в широкий нижний бьеф сочетается с перераспределением скоростей течения в вертикальной плоскости (зоны прыжков) или с уменьшением вниз по течению средней скорости, что имеет место при увеличении глубины потока. В обоих случаях в потоке возникают значительные силы инерции.

Причина увеличения расходов заключается в своеобразии условий равновесий потока при наличии застойных пазух,

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

в которых образуются водовороты, окаймляющие транзитную струю. В отличие от ограниченного берегами призматического или плавно расширяющегося потока динамическое равновесие водных масс в широком бьефе достигается не только за счет уклона водной поверхности, но и за счет изменения сил инерции, регулируемых сооружением или расширением транзитной струи.

Увеличение удельных расходов может быть оценено по следующему равенству, составленному для русла прямоугольного сечения:

$$\frac{q_x}{q_0}=\frac{1}{2}\,\frac{\alpha_0}{\alpha_x}\cdot\frac{h}{h_0}+\frac{1}{4}\,\frac{B_0}{B}\left(1-\frac{\alpha_0 h}{\alpha_x h_0}\right)+$$

$$+\sqrt{\frac{{\alpha_0}^2 h^2}{{\alpha_x}^2 h_0^2}+2\frac{B_0}{B}\left(1-\frac{\alpha_0 h}{\alpha_x h_0}\right)\left[\frac{1}{8}\,\frac{B_0}{B}\left(1-\frac{\alpha_0 h}{\alpha_x h_0}\right)+\frac{1}{2}\,\frac{\alpha_0 h}{\alpha_x h_0}+1\right]},$$

где q_x — удельный расход воды в расчетном створе ниже места истечения в широкий бьеф;

q_0 — удельный расход воды в месте истечения (на подходном участке);

B, h и α_x — ширина, глубина и корректирующий множитель в расчетном створе;

B_0, h_0 и α_0 — ширина, глубина и корректирующий множитель для количества движения на подходном участке.

2. В явлениях местного размыва значительную роль играет пульсация скоростей. Если в пределах водобоя и рисбермы поток, сброшенный через плотину, полностью успокаивается и подходит к месту размыва с нормальным распределением скоросей по вертикали, в яме размыва вследствие увеличения вертикальных градиентов осредненных поступательных скоростей интенсивность пульсации возрастает. Наиболее сильной пульсация оказывается в месте максимального размыва дна.

Если же к концу рисбермы поток подходит сильно возмущенным (при резко выраженном поверхностном или донном режиме), то с вступлением в пределы ямы размыва в нем происходит гашение пульсаций. Однако частично погашенные пульсации могут по абсолютной величине превышать пульсации, соответствующие нормальному режиму сбегающего потока.

3. Размыв дна реки в нижнем бьефе плотин и гидростанций происходит, во-первых, вследствие поступления в нижний бьеф воды, полностью или частично освободившейся в водохранилище от наносов, и, во-вторых, в результате нарушения скоростного режима под влиянием сооружений.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

4. В плоском, свободном от наносов потоке при полном гашении избыточной энергии струи в пределах водобоя и рисбермы место наиболее глубокого размыва дна после стабилизации процесса сопрягается с концом крепления плавным откосом. Ниже по течению от подошвы откоса дно немного повышается и устанавливается на такой глубине, при которой скорости течения получают неразмывающие для данного грунта значения в условиях равномерного потока.

Некоторое увеличение глубины размыва непосредственно у подошвы откоса объясняется следующим.

В месте наибольшего размыва осредненная придонная скорость близка к нулю. При этом частицы грунта расшатываются переменными по знаку пульсационными скоростями. В результате расшатывания частицы теряют устойчивость и легко выносятся потоком в те моменты, когда появляется редкая по повторяемости, но значительная по величине мгновенная пульсационная скорость.

По опытным данным величина переуглубления при сравнительно однородном песке составляет приблизительно 5% от глубины, соответствующей неразмывающей скорости при равномерном потоке.

В соответствии с изложенным, при полностью успокоенном на рисберме потоке без наносов наибольшая глубина размыва может быть установлена с помощью равенства

$$h = 1{,}05 \sqrt[1{,}2]{\frac{q}{U_{н}}},$$

где h — глубина воды в метрах за рисбермой в месте наибольшего размыва дна;

q — удельный расход воды;

$U_{н}$ — неразмывающая дно скорость течения, отнесенная к глубине 1 *м*.

5. При поверхностном и донных режимах скоростей течения в конце рисбермы, сопровождающихся повышенной пульсацией, глубина размыва существенно возрастает. В этих случаях над верховым откосом ямы размыва появляется обширная вальцевая область. Крепление, как правило, подмывается.

Для оценки глубины размыва в условиях указанных режимов можно использовать рассмотренный в работе метод определения осредненных продольных скоростей. Приложение такого приема к практическим задачам местного размыва дна потребует накопления экспериментального материала, характеризующего граничные скорости в придонной области ямы при стабилизации размыва.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

6. В пространственных условиях, которые создаются сбросом воды узким водосливным фронтом в широкий нижний бьеф, необходимо учитывать увеличение удельных расходов воды в месте размыва дна по сравнению с расходом на сооружении.

Глубина воды после размыва с учетом увеличения удельного расхода будет равна:

$$h=\left\{1{,}05\frac{U_0}{2U_{\text{н}}}\left[\frac{\alpha_0}{\alpha_x}+\frac{1}{2}\frac{B_0}{B}\left(\frac{h_0}{h}-\frac{\alpha_0}{\alpha_x}\right)+\right.\right.$$

$$\left.\left.+\sqrt{\frac{\alpha_0^2}{\alpha_x^2}+2\frac{B_0}{B}\left(\frac{h_0}{h}-\frac{\alpha_0}{\alpha_x}\right)\left[\frac{1}{8}\frac{B_0}{B}\left(\frac{h_0}{h}-\frac{\alpha_0}{\alpha_x}\right)+\frac{1}{2}\frac{\alpha_0}{\alpha_x}+\frac{h}{h_0}\right]}\right]\right\}^5.$$

Здесь h — глубина воды в месте наибольшего размыва в метрах;

U_0, B_0 и h_0 — скорость течения, ширина и глубина потока на рисберме.

При равномерном распределении удельных расходов на водосливе глубина размыва оценивается разными приемами в зависимости от того, будет ли в нижнем бьефе иметь место отрыв потока от берегов или нет.

7. Если дно реки за рисбермой сложено неоднородным по составу материалом, при проектировании крепления нижнего бьефа и расчетах деформаций дна желательно учитывать образование отмостки из крупного материала, образующейся в процессе размыва.

8. В случае устройства за рисбермою плотины ковша с закрепленным верховым откосом можно допускать неполное гашение избыточной энергии потока на горизонтальной части рисбермы. При правильном выборе размеров ковша им можно воспользоваться как гасителем некоторой части избыточной энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. А. Мацман. Статья в журн. «Вестник ирригации», № 3, 1927.
2. А. Н. Патрашев. Определение максимальной глубины размыва грунта, производимого ниспадающей струей. Изв. НИИГ, т. XXI, 1937.
3. A. Schoklitsch. Geschiebewegung in Flüssen und an Stauwerken. 1926.
4. М. С. Вызго. К вопросу о местных размывах. Гидротехническое строительство, № 9, 1940.
5. М. С. Вызго. Уменьшение размывов и увеличение габаритов струи и глубин быстротекущих потоков. Гидротехническое строительство, № 7, 1947.
6. Н. Т. Смолянинов. Влияние режима протекания потока и крупности наносов на местный размыв в нижнем бьефе сооружений. Гидротехническое строительство, № 4, 1951.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

7. Е. А. Замарин, К. В. Попов, В. В. Фандеев. Гидротехнические сооружения. Сельхозгиз, М., 1952.
8. И. И. Леви. Динамика русловых потоков. Госэнергоиздат, 1948.
9. С. В. Избаш. Гидравлика производства работ по преграждению русла. Госстройиздат, 1939.
10. И. А. Тер-Аракелян. К вопросу о местном размыве за рисбермой плотины. Гидротехническое строительство, № 10, 1952.
11. И. И. Тараймович. Исследование различных типов гасителей. Гидротехническое строительство, № 1, 1951.
12. Д. И. Кумин. Поверхностный водоворот гидравлического прыжка и гашение энергии. Изв. ВНИИГ, т. 40, 1949.
13. И. И. Тараймович. Об определении наибольшей глубины местного размыва. Гидротехническое строительство, № 10, 1948.
14. И. П. Личчевский. Влияние нижнего бьефа на сопряжение бьефов. Госэнергоиздат, 1934.
15. Н. В. Халтурина. Отчет по предварительным исследованиям влияния неравномерности распределения скоростей в плане на размыв за креплением. Рукопись, 1952. Архив Гидропроекта.
16. О. Рейнольдс. Динамическая теория движения несжимаемой вязкой жидкости и определение критерия. Сб. «Проблемы турбулентности». ОНТИ, 1936.
17. Л. Прандтль. Гидроаэромеханика. Изд. иностр. лит-ры, 1951.
18. И. М. Коновалов. Свободные и турбулентные струи жидкости. Тр. Ленингр. ин-та инж. водн. трансп., вып. XIV, 1947.
19. Ф. Франк и Р. Мизес. Дифференциальные и интегральные уравнения математической физики. ОНТИ, 1937.
20. С. Ф. Савельев. Исследование вертикальной составляющей скорости потока. Изв. ВНИИГ, т. XXII, 1938.
21. И. А. Михайлова, Н. Б. Найденова. О структуре потока при наличии песчаных волн. Изв. АН СССР, № 5, 1953.
22. Е. М. Минский. Турбулентность руслового потока. Гидрометеоиздат, 1952.
23. A. A. Kalinske. Ralation of the statistical theory of turbulence to hydraulics. Proceedings of the A. S. C. E. Oct., 1939.
24. A. Fage. Effect of contraction on the turbulence in a fluid stream, 1934.
25. Б. А. Фидман. Поле скоростей в водном потоке при внезапном увеличении глубины. Изв. АН СССР, № 4, 1953.
26. Б. А. Фидман. Результаты измерения турбулентности в равномерном и резко расширяющемся потоках. Изв. АН СССР, № 11, 1953.
27. Д. И. Кумин. Затухание пульсации скорости на водобое гидротехнических перепадов. Тезисы докладов на совещании по проектированию бетонных водосливных плотин на нескальных основаниях (ВНИТО строителей). Рукопись, 1953.
28 Б. В. Поляков. Гидрология бассейна р. Дона. Строительство Волго-Дона, вып. VIII, 1930.
29 П. П. Лаупман. Предложение по экономическим решениям некоторых основных вопросов крупного гидротехнического строительства. Гидротехническое строительство, № 1, 1951.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

С. Н. КРИЦКИЙ, М. Ф. МЕНКЕЛЬ

ОБ ОЦЕНКЕ ВЕРОЯТНОЙ ПОВТОРЯЕМОСТИ РЕДКО НАБЛЮДАЕМЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

§ 1. О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН, ЗАНИМАЮЩИХ ОПРЕДЕЛЕННЫЕ МЕСТА В ВЫБОРКЕ, РАСПОЛОЖЕННОЙ В УБЫВАЮЩЕМ ПОРЯДКЕ

При решении гидрологических задач, опирающемся на материалы наблюдений за режимом стока или за обусловливающими сток гидрометеорологическими явлениями, нередко возникает потребность в индивидуальной оценке вероятной повторяемости каждого отдельного наблюдения, в особенности тех наблюдений, которые характеризуют редко повторяющиеся события. В тех случаях, когда цель исследования заключается в оценке соответствия теоретических расчетов данным наблюдений, возникает вопрос о таких приемах оценки, которые были бы свободны от всякого рода априорных допущений и опирались только на информацию, полученную в результате наблюдений.

С подобного рода задачами мы встречаемся, например, при сопоставлении теоретических кривых обеспеченности с результатами непосредственных наблюдений; в частности, к этой категории относятся исследования экстремальных по величине, редких по повторяемости гидрологических и метеорологических явлений — высоких и низких расходов воды, больших и малых количеств выпадающих в водосборе атмосферных осадков и т. п.

В настоящем параграфе будут рассмотрены математические построения, лежащие в основе подобного рода исследований*.

* * *

Рассмотрим некоторую случайную величину x, распределение плотности вероятностей которой выражается $p'(x)$.

* Предлагаемые построения были выполнены в 1947 г. и включены в состав научного отчета [1].

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Интегральное распределение вероятностей переменной x представляется уравнением:

$$p = p(x) = \int_x^{\infty} p'(x)\,dx$$

(кривую, выраженную этим уравнением, в гидрологии принято называть «кривой обеспеченности»).

Значениями $p(x)$, характеризующими при простом однократном испытании вероятность превышения заданной величины x, мы будем широко пользоваться в дальнейшем. При заданном законе распределения вероятностей значения вероятности превышения p однозначно определяют величину x. В гидротехнических материалах очень часто расходы воды характеризуются не абсолютной величиной, а вероятностью ежегодного превышения (обеспеченностью).

Представим себе случайную выборку величин x. Положим, что распределение вероятностей $p(x)$ выражается определенной кривой обеспеченности. Тогда каждому члену выборки x_i соответствует определенная вероятность превышения p_i. Значения p_i, отвечающие членам случайной выборки x_i, могут в свою очередь рассматриваться как случайные величины, плотность вероятностей которых распределяется равномерно на протяжении интервала $0 \leqslant p \leqslant 1$.

Распределение вероятностей случайных величин p, которые сами являются вероятностями, символически можно записать в форме $P = P(p)$.

Пользуясь гидрологической терминологией, зависимость $P(p)$ можно назвать «кривой обеспеченности обеспеченностей». Ординаты p представляют собой, как мы говорили, вероятности превышения величин x при случайном однократном испытании, абсциссы же P характеризуют вероятности непревышения ординат p. В рассматриваемом нами элементарном случае эти вероятности равны друг другу, и уравнение $P = P(p)$ имеет простейший вид $P = p$.

В дальнейшем нам придется изучать распределение переменной p при более сложных схемах выборки. Соответственно усложнится и зависимость $P(p)$. Распределение вероятностей превышения x при какой-либо сложной схеме выборки обозначим $P(x)$; за символом p попрежнему сохраним смысл исходной вероятности превышения, отвечающей простому однократному испытанию.

Связь между функциями $P(x)$ и $P(p)$ выражается, очевидно, равенством

$$\frac{dP(p)}{dp} = \frac{dP(x)}{dx} \cdot \frac{dx}{dp}.$$

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Представим себе теперь серию случайных выборок величины x, каждая объемом n.

Расположим каждую из выборок в убывающем порядке (табл. 1). Обозначим порядковый номер выборки буквой j, номер члена выборки — буквой m.

Таблица 1

Номера членов выборки в убывающем порядке	Номера выборок		
	1	2 . . .	j . . .
1 2	x_{11} x_{21}	x_{12} . . . x_{22} . . .	x_{1j} . . . x_{2j} . . .
m	x_{m1}	x_{m2} . . .	x_{mj} . . .
n	x_{n1}	x_{n2} . . .	x_{nj} . . .

Таблице расположенных в убывающем порядке величин x_{mj} соответствует таблица вероятностей превышения p_{mj}, размещенных в возрастающем порядке (табл. 2).

Таблица 2

Номера членов выборки в возрастающем порядке	Номера выборок		
	1	2 . . .	j . . .
1 2	p_{11} p_{21}	p_{12} . . . p_{22} . . .	p_{1j} . . . p_{2j} . . .
m	p_{m1}	p_{m2} . .	p_{mj} . .
n	p_{n1}	p_{n2} . . .	p_{nj} . . .

Для наглядности ниже приводится числовой пример случайных выборок величин x_{mj} и соответствующих им вероятностей превышения p_{mj}, размещенных в убывающем и в возрастающем порядке (табл. 3). При построении этого примера принято, что исходное распределение вероятностей величин $p(x)$ выражается кривой обеспеченности фиг. 1. Объем каждой из выборок принят равным $n = 5$; в примере рассматриваются шесть выборок.

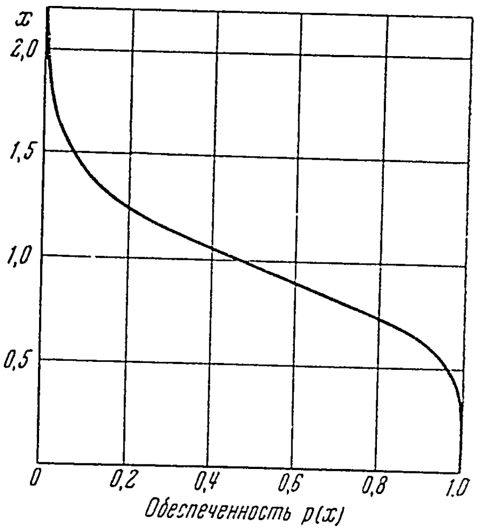
Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Таблица 3

Номер члена выборки	Номер выборок	j: 1	2	3	4	5	6
		Выборки x в убывающем порядке					
m	1	1,59	1,22	1,28	1,22	1,30	1,83
	2	1,40	0,91	1,05	0,83	1,02	1,14
	3	1,30	0,89	0,99	0,71	0,97	1,12
	4	1,23	0,87	0,98	0,68	0,85	1,03
	5	0,82	0,72	0,80	0,63	0,70	0,72
		Выборки p в возрастающем порядке					
m	1	4	22	17	22	15	1
	2	10	58	40	69	44	29
	3	15	61	47	81	50	31
	4	21	64	48	87	67	43
	5	70	83	73	91	85	83

Установим распределение вероятностей членов выборок x_{mj}, занимающих определенные места m в порядке убывания. Обозначим его символом $P_m(x)$. Распределение вероятностей $P_m(x)$ связано с распределением вероятностей обеспеченностей p, которое мы обозначим символом $P_m(p)$. Порядковый номер m характеризует, как было сказано, место, занимаемое данной величиной в составе выборки, расположенной в убывающем порядке. Самому большому члену выборки соответствует $m=1$, самому малому $m=n$.



Фиг. 1. Кривая обеспеченности $\bar{x}=1$; $C_v=0{,}3$; $C_s=0{,}6$

Начнем исследование с функции $P_m(p)$, т. е. с кривой «обеспеченности обеспеченностей» величин, занимающих в убывающем порядке места m в выборках объема n.

Построение кривой $P_m(p)$ может быть произведено при помощи следующего известного из математической статистики

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

положения: если вероятность наступления некоторого случайного события при однократном испытании составляет p и производится n независимых испытаний, то вероятность того, что событие произойдет k раз (где $k=0;\ 1;\ 2\ldots n-1;\ n$) определяется членами разложения бинома Ньютона:

$$[(1-p)+p]^n=(1-p)^n+n(1-p)^{n-1}\cdot p+ \\ +\ldots C_n^k(1-p)^{n-k}\cdot p^k+\ldots p^n. \qquad (1)$$

Здесь $C_n^k=\frac{n!}{k!\,(n-k)!}$ — биномиальный коэффициент, равный, как известно, числу сочетаний из n величин по k. В нашем случае под «событием», вероятность которого равна p, мы понимаем появление при случайном испытании значения x, превышающего ту величину x_p, вероятность превышения (обеспеченность) которой равна p.

Исследуем прежде всего распределение вероятностей самого малого члена случайных выборок, для которого $m=n$. Рассмотрим сложное событие, заключающееся в том, что при независимых испытаниях самый малый член выборки x_n превысит некоторое значение x_p. Вероятность P_n этого сложного события равна вероятности n-кратного повторения неравенства $x>x_p$. Иными словами,

$$P_n=p^n. \qquad (2)$$

Это соотношение, как нетрудно заметить, непосредственно вытекает из разложения написанного выше бинома, последний член которого равен p^n. Уравнение (2) и выражает искомое распределение вероятностей («обеспеченности обеспеченностей») $P_n(p)$ для самых малых членов выборок.

Перейдем к предпоследним в порядке убывания членам выборки, т. е. к $m=n-1$. В этом случае мы должны рассмотреть сложное событие, заключающееся в том, что при n независимых испытаниях предпоследний по величине член выборки превышает некоторую величину x_p, вероятность превышения которой при однократном испытании равна p. Вероятность этого сложного события равна сумме двух вероятностей:

а) вероятности того, что все n членов выборки превысят величину x_p (так как в этом случае и подавно $x_{n-1}>x_p$);

б) вероятности того, что все члены выборки, кроме одного, превысят x_p.

Первая из указанных вероятностей, как нетрудно заметить, равна найденной нами выше вероятности P_n, определенной уравнением (2).

74-б

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Вероятность того, что все члены выборки, кроме одного, превысят x_p, выражается предпоследним членом разложения бинома Ньютона

$$n(1-p)\cdot p^{n-1}.$$

Таким образом, искомая вероятность

$$P_{n-1}=n(1-p)\cdot p^{n-1}+p^n. \qquad (3)$$

Распространяя ту же последовательность рассуждений на следующие члены выборки, можно получить общее выражение интегрального распределения вероятностей $P_m(p)$ в форме

$$P_m(p)=\sum_{k=m}^{k=n} C_n^k(1-p)^{n-k}\cdot p^k. \qquad (4)$$

Таким образом, абсцисса кривой «обеспеченности обеспеченностей» члена выборки, занимающего в убывающем порядке место m, равна сумме членов разложения бинома (1), отвечающих значениям k от $k=m$ до $k=n$. Для значений m, близких к единице, т. е. для больших членов выборки, занимающих в убывающем порядке первые, вторые места и т. д., удобнее выводить закон $P_m(p)$ путем вычитания из единицы суммы членов разложения, отвечающих порядковым номерам $k<m$. Так, для самых больших членов выборок ($m=1$) получим

$$P_1(p)=1-(1-p)^n. \qquad (5)$$

Для вторых по величине членов ($m=2$) аналогичное выражение запишется в виде

$$P_2(p)=1-(1-p)^n-n(1-p)^{n-1}\cdot p. \qquad (6)$$

и т. д.

На фиг. 2 изображены кривые «обеспеченности обеспеченностей» $P_m(p)$ для $m=1$; 2; 3; 4; 5; при $n=5$ (выборки объемом в пять членов).

Отметим, что распределение (4), выражаемое членами разложения бинома Ньютона, приближенно характеризуется значениями интегралов нормальной кривой распределения Гаусса

$$P_m=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_x^{\infty} e^{-\frac{1}{2}t^2}dt,$$

где нормированное отклонение

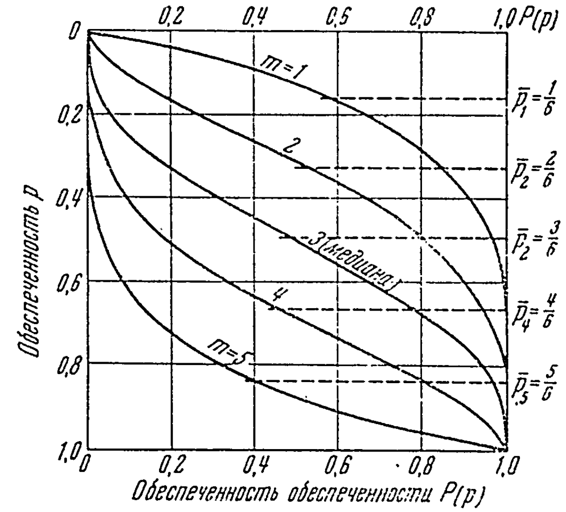
$$x=\frac{m-pn}{\sqrt{np(1-p)}}. \qquad (7)$$

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

К этому выражению приближаются кривые «обеспеченности обеспеченностей» $P_m(p)$ при больших выборках и при m, близких к $\frac{n}{2}$ *.

Зная уравнения кривых «обеспеченности обеспеченностей» $P_m(p)$, мы можем найти математическое ожидание $\overline{p}_m$, иными словами, среднее из множества выборок значение



Фиг. 2. Кривые обеспеченности обеспеченностей величин, занимающих места m в случайных выборках объема $n=5$, размещенных в убывающем порядке

обеспеченности, характеризующее m-й в убывающем порядке член.

Нетрудно показать, что

$$\overline{p}_m=\frac{m}{n+1}. \tag{8}$$

Для того чтобы убедиться в этом, рассмотрим сначала случай $m=n$, для которого по уравнению (2) $P_n=p^n$.

Искомое математическое ожидание

$$\overline{p}_n=\int_0^1 p\,dP=\int_0^1 pnp^{n-1}dp=\frac{n}{n+1}.$$

* Понятно, что в нашей трактовке независимой переменной является вероятность превышения p, а m и n играют роль параметров.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Подобным же образом при $m = n - 1$ по уравнению (3)

$$P_{n-1} = p^n + np^{n-1}(1-p).$$

Соответственно

$$\bar{p}_{n-1} = \int_0^1 p dP = \int_0^1 p\,[np^{n-1} + n(n-1)\,p^{n-2} - n^2 p^{n-1}]\,dp =$$

$$= n(n-1)\left[\int_0^1 p^{n-1}dp - \int_0^1 p^n dp\right] =$$

$$= \frac{n(n-1)}{n} - \frac{n(n-1)}{n+1} = \frac{n-1}{n+1}.$$

Распространяя аналогичные рассуждения на любые m, можно убедиться в универсальности формулы (8).

Так, при $m = 1$

$$\bar{p}_1 = \frac{1}{n+1}$$

и т. д.

Нетрудно заметить, что формула (8) дает симметричное относительно медианы размещение точек на оси обеспеченности. При этом интервалы между смежными членами выборки одинаковы и равны $\frac{1}{n+1}$. Таким образом, формула приводит к равномерному размещению математических ожиданий вероятностей превышения членов выборки на протяжении отрезка 0—1.

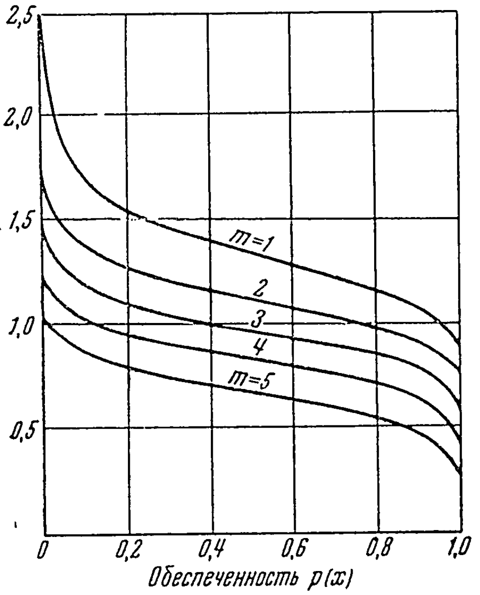
От кривых «обеспеченности обеспеченностей» $P_m(p)$ можно перейти к кривым обеспеченности самих величин x_m, занимающих в убывающем порядке места m в выборках объема n. Такой переход требует, понятно, знания исходного распределения вероятностей $p(x)$. Приписывая значениям x_p вероятности превышения P_m, которые, согласно рассмотренной нами зависимости $P_m(p)$, характеризуют соответствующие величины p, мы получим искомую кривую обеспеченности $P_m(x)$. Подобное перестроение изображено на фиг. 3 для кривых «обеспеченности обеспеченностей», представленных на фиг. 2. Для перехода от кривых $P_m(p)$ к кривым $P_m(x)$ была принята изображенная на фиг. 1 биномиальная кривая. (Приемы построения кривых $P_m(p)$ и $P_m(x)$ были впервые намечены в работе [4].)

Сопоставляя между собой кривые $P_m(p)$ и $P_m(x)$, нетрудно заметить, что каждой точке кривой $P_m(p)$ отвечает вполне

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

определенная точка кривой $P_m(x)$. Это приводит к тому, что значения x_m и p_m, характерные по вероятности превышения (медиана, квадрильяна и т. п.), также соответствуют друг другу, т. е. являются ординатой и абсциссой одной и той же точки исходной кривой $p(x)$. Однако распределения $P_m(x)$ и $P_m(p)$ различны. Вследствие этого такие характеристики, как средние $\bar{x}_m$ и $\bar{p}_m$, моды и т. д., не соответствуют друг другу, т. е. не являются координатами одной и той же точки исходной кривой $p(x)$.



Фиг. 3. Кривые обеспеченности величин x, занимающих места m в случайных выборках объема $n=5$, размещенных в убывающем порядке

* * *

В результате анализа мы пришли к двум возможным формам искомых зависимостей. Первая из них сводится к кривым «обеспеченности обеспеченностей» $P_m(p)$, вторая — к кривым обеспеченности $P_m(x)$. Между этими кривыми существует принципиальное различие.

Распределение «обеспеченности обеспеченностей» $P_m(p)$ полностью определяется объемом выборки n и порядковым номером m. Это распределение *не зависит от исходного распределения вероятностей* $p(x)$. В противоположность этому, распределение вероятностей самих членов выборки, занимающих m-ое место в убывающем порядке, зависит от исходного распределения $p(x)$.

Пусть, например, нами установлено, что некоторая величина расхода воды была наивысшей в данном створе реки за 50 лет. Тот факт, что наблюдавшийся экстремум оказался самым высоким из 50 годовых максимумов, уже сам по себе дает основание для оценки вероятной частоты повторения подобных исключительных явлений независимо от того, как распределялись в составе выборки остальные 49 величин. Можно представить себе, например, случаи, когда наши сведения о высоких расходах реки ограничиваются установленной по историческим свидетельствам высотой исключительного половодья, о котором известно, что оно ни разу не было превышено

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

за определенный период. Этого факта достаточно для оценки вероятной повторяемости подобных явлений. Основанием для такой оценки и служат кривые «обеспеченности обеспеченностей» $P_m(p)$. Однако, не имея сведений о высоте половодий за ряд лет, мы не можем судить о том, насколько зарегистрированный максимум выделяется среди высоких расходов, ежегодно наблюдающихся на той же реке. Оценка относительной высоты рассматриваемого максимума, характеризуемой кривой $P_m(x)$, связывается со знанием распределения вероятностей $p(x)$.

* *
*

Приведем некоторые примеры применения полученных выводов к решению гидрологических задач.

Одним из таких примеров может служить исследование вероятной повторяемости экстремальных (высоких и низких) расходов воды, основанное на одновременном анализе материалов наблюдений по различным рекам. Необходимость подобных исследований вызывается тем, что изолированный анализ наличных гидрологических рядов, относящихся к каждой отдельной реке, не дает надежного суждения об исключительных явлениях редкой повторяемости и вынуждает прибегать к недостаточно обоснованной экстраполяции кривых обеспеченности за пределы наблюдений. Одновременное рассмотрение материалов по группе гидрологически сходных рек может в известной мере восполнить этот пробел. Предположим, что в нашем распоряжении имеется некоторое количество N выборок случайной величины x с объемом (численностью) каждой выборки n. Примем для большей конкретности, что эти выборки представлены ежегодными значениями максимальных расходов x половодий различных рек числом N, полученными в результате наблюдений за n лет по каждой реке. Допустим далее, что эти выборки статистически независимы одна от другой (иначе говоря, что синхронность в колебаниях максимального стока на разных реках отсутствует) и что распределение вероятностей ежегодных величин максимальных расходов воды может быть выражено для рассматриваемых рек некоторой теоретической кривой (например, биномиальной кривой распределения вероятностей).

Тогда, отобрав значения $x^*_{(n)}$, самые высокие из составляющих каждую выборку значений x, и пользуясь известными для каждой реки кривыми обеспеченности величин x, можно перейти от величин $x^*_{(n)}$ к соответствующим им обеспеченностям p.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Расположив полученные величины p в порядке возрастания и приписав каждой из них обеспеченность P по формуле $P=\frac{1}{N+1}$, получим эмпирический график «обеспеченности обеспеченностей». (Построение зависимости непосредственно между $x^*_{(n)}$ и $P(x)$ в рассматриваемом случае исключается, так как значения $x^*_{(n)}$ являются выборками из различных гидрологических рядов, каждому из которых отвечают свои параметры — среднее, коэффициент изменчивости, коэффициент асимметрии.)

Полученный эмпирический график можно совместить с теоретической кривой «обеспеченности обеспеченностей» (5), отличающейся тем, что построение ее не только свободно от допущений о распределении исходных величин x, но и не требует выборочной оценки каких-либо параметров, кроме объема выборок (числа лет наблюдения n). Сопоставление позволяет оценить степень соответствия теоретических предположений наблюдаемой в природе повторяемости особо высоких максимумов; этим достигается известное обоснование очень важной для практики гидротехнического проектирования оценки исключительных по величине и повторяемости гидрологических явлений (примеры подобного анализа можно найти в работах [2] и [3]; там же даны некоторые количественные выводы, относящиеся к максимальным расходам половодий и объемам годового стока рек Европейской части СССР, а также к суточным максимумам атмосферных осадков).

С другим примером применения рассмотренных математических построений мы встречаемся в следующем параграфе этой работы, посвященном некоторым вопросам композиции функций распределения вероятностей гидрологических величин. Как и в предыдущем случае, речь идет об оценке экстремальных величин речного стока, однако вопрос рассматривается с существенно иных позиций.

Воспользуемся в заключение приведенными выше исследованиями для подтверждения и истолкования обычных в гидротехнической практике приемов совмещения теоретических кривых обеспеченности гидрологических величин с данными наблюдений. Такое совмещение, как известно, имеет целью эмпирическую проверку теоретических кривых обеспеченности, применение которых к гидрологическим явлениям связано с рядом условных предположений. При этом возникает вопрос о способах наилучшей оценки вероятности превышения отдельных наблюдавшихся величин. Такая оценка по смыслу задачи должна исходить только из учета того места, которое занимает каждая зарегистрированная наблюдениями величина при рас-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

положении их в ряд в убывающем порядке; использование каких-либо положений, связанных с самой проверяемой кривой, не может быть допущено.

Материал, которым мы располагаем для оценки, сводится к двум видам кривых обеспеченности $P_m(x)$ и $P_m(p)$. При этом кривые $P_m(p)$ не зависят от исходного распределения $p(x)$, в то время как кривые $P_m(x)$ от него зависят.

Поскольку по самой постановке задачи исходное распределение $p(x)$ нам неизвестно, постольку единственным возможным основанием для суждения о вероятности наблюдавшихся величин могут служить рассмотренные выше кривые «обеспеченности обеспеченностей» $P_m(p)$. С этой точки зрения имеющиеся в литературе предложения, исходящие из приравнивания наблюдавшейся величины среднему (по множеству выборок) значению члена $\overline{x}_m$ или модальному его значению (см., например, статью [5]), должны быть исключены из рассмотрения. Остается выбрать наилучшее решение из возможных, т. е. из тех, для отыскания которых достаточно знания кривой «обеспеченности обеспеченностей».

Такими решениями могут быть следующие:

а) математическое ожидание обеспеченности, равное, согласно формуле (8),

$$\overline{p}_m = \frac{m}{n+1};$$

б) медиана кривой $P_m(p)$; приближенным выражением ее служит формула, предложенная Н. Н. Чегодаевым:

$$p_m = \frac{m-0{,}3}{n+0{,}4}.$$

В гидротехнической практике иногда применяется выражение А. Хазена

$$p_m = \frac{m-0{,}5}{n}.$$

Согласно этому выражению, величины p_m принимаются совпадающими с серединами равных отрезков числом n, на которые разделяется интервал оси обеспеченности $0 \leqslant p \leqslant 1$. Такой прием приводит к явно неправильным оценкам повторяемости экстремальных величин. При $m=1$ и $m=n$ обеспеченности крайних членов выборки оказываются равными $p_1 = \frac{1}{2n}$, $p_n = 1 - \frac{1}{2n}$, иными словами, повторяемость наибольшей и наименьшей из наблюдавшихся величин относится к удвоенному периоду наблюдений, для чего нет логических оснований.

Выбор решения требует формулировки условия, которому должна удовлетворять искомая наилучшая оценка. Критерий же качества оценки должен вытекать из тех практических задач,

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

для решения которых искомые оценки вероятностей превышения служат исходным материалом.

В гидротехнической практике за критерий надежности работы сооружений принимается обычно вероятность ежегодного нарушения нормальной работы установки, вызванного избытком (или недостатком) воды. Так, рассчитывая водосливные сооружения на максимальный расход вероятностью превышения 0,01, мы допускаем в среднем один случай превышения расчетного расхода в столетие. С тем же критерием следует подойти и к решению рассматриваемой задачи. Положим, например, что по множеству рек мы определяем размеры водосбросных сооружений, исходя из наибольших расходов воды, наблюдавшихся на каждой из рек за n лет. В среднем по множеству объектов и при длительной их эксплуатации частота перебоев, с которой пришлось бы считаться при работе рассчитанных описанным способом сооружений, приближалась бы к найденному нами выше математическому ожиданию $\overline{p}_1$ вероятности превышения самых высоких членов выборок объема n. В той мере, в какой число перебоев является общепринятым в гидротехнической практике критерием, мы можем считать математическое ожидание $\overline{p}_m$ (8) искомой наилучшей оценкой.

Следует отметить, что формулу (8) можно вывести и не прибегая к изложенным выше математическим выкладкам, и притом значительно проще — путем чисто логических рассуждений *. Избранным нами способом доказательства мы имели в виду показать одно из возможных приложений рассмотренных математических построений и вместе с тем воспользоваться ими для наглядного истолкования исходных положений и смысла формулы (8).

§ 2. ОБ ОЦЕНКЕ ВЕРОЯТНОСТИ ПРЕВЫШЕНИЯ РАСХОДОВ ВОДЫ, ЯВЛЯЮЩИХСЯ РЕЗУЛЬТАТОМ СОВПАДЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗА ПЕРИОД НАБЛЮДЕНИЙ ВЕЛИЧИН ФОРМИРУЮЩИХ СТОК ФАКТОРОВ

К методике композиции функций распределения вероятностей гидрологических величин

За последние годы получило развитие новое направление в изучении колебаний речного стока — так называемый композиционный метод построения функций распределения вероятностей. Этот метод, идея которого была впервые предложена М. А. Великановым в 1947 г. [8], заключается в расчленении

* На это обстоятельство указал при просмотре работы [1] А. Н. Колмогоров. Им же отмечено, что равенство (8) было впервые рекомендовано для статистических оценок в работе Wilks, 1941 (см. [6], а также [7]).

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

колебаний изучаемой характеристики стока на компоненты, зависящие от колебаний отдельных влияющих на сток гидрологических и метеорологических факторов; исследуются вероятности различных сочетаний этих факторов, и этим определяются вероятности различных величин стока. Так, располагая зависимостью, связывающей, например, объемы стока за половодье некоторой реки с запасами воды в снеговом покрове и с коэффициентом весеннего стока, можно, применяя метод композиции, получить кривую распределения объемов половодного стока. Для суждения о распределении вероятностей аргументов служат выборки, составленные по наблюдениям за истекший период. Эффект метода зависит от уточнения выборочных оценок параметров изучаемого распределения, достигаемого в известных условиях в результате расчленения колебаний на компоненты по сравнению с обычными приемами непосредственного анализа гидрологических выборок.

При разработке композиционного метода возникает ряд принципиальных и технических вопросов, рассмотреть которые мы предполагаем в будущем. В настоящей работе мы хотели бы привлечь внимание исследователей, занимающихся применением композиционного метода, к одной частной задаче. Она заключается в оценке вероятности превышения величины стока, соответствующей сочетанию экстремальных за период наблюдений величин его компонентов. Такая задача характерна тем, что решение ее опирается только на непосредственную информацию, получаемую путем наблюдений компонентов изучаемого гидрологического явления, и исключает какую бы то ни было экстраполяцию участвующих в построении величин за пределы охваченного наблюдениями интервала. Именно так, например, обстоит дело, когда мы хотим получить суждение о возможной высокой величине стока весеннего половодья, допуская, что самый большой запас воды в снеге, наблюдавшийся в каком-либо году, совпадает с самым высоким коэффициентом стока, отмеченным в каком-либо другом году. Очевидно, что подобный подход наиболее радикален в смысле освобождения результатов от каких бы то ни было априорных предположений, относящихся к выбору типов кривых распределения вероятностей аргументов и т. п. Ближайшая цель нашей работы заключается в оценке выводов, которые могут быть получены из такого рода анализа.

* * *

Рассмотрим случай статистически независимых аргументов композиционного построения. В этом случае простейший и наиболее наглядный подход к анализу заключается

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

в образовании выборки, которую можно назвать комбинированной. Подобная выборка получается путем образования всех возможных сочетаний зарегистрированных наблюдениями величин аргументов и определения соответствующих этим сочетаниям величин исследуемых расходов воды. Число таких сочетаний равно

$$N = n^k,$$

где n — число лет наблюдений, по которым имеются данные о величинах аргументов, используемых при композиционном построении;

k — число аргументов.

Так, если композиционный расчет проводится по наблюдениям за $n = 50$ лет, а число аргументов $k = 2$, то число членов комбинированной выборки составляет $N = 2500$.

Размещая комбинированную выборку в убывающем порядке, мы получаем ряд величин, как бы равноценный ряду из N независимых наблюдений. Отсюда, казалось бы, напрашивается и простейшее вероятностное толкование этого ряда: наибольший член его относится к вероятности превышения $\frac{1}{N+1} \simeq \frac{1}{N}$. При этом принимается, что

$$p_m = \frac{m}{N+1} \simeq \frac{m}{N}. \tag{9}$$

Здесь p_m — вероятность превышения величины, порядковый номер которой при расположении в выборке в убывающем порядке равен m;

N — число членов ряда.

Именно такое толкование, подкупающее простотой и удобством расчетов, можно найти в некоторых, пока немногочисленных, работах, посвященных применению композиционного метода в гидрологии [8—11]. Однако нетрудно убедиться в том, что оценка по равенству (9) вероятности превышения экстремальных членов комбинированной выборки справедлива лишь при том обязательном условии, что экстремальные величины аргументов, зарегистрированные в период наблюдений, являются абсолютными пределами, вероятность нарушения которых равна нулю. (Принятие этого требования означало бы, что кривые обеспеченности аргументов как бы ограничиваются горизонтальными площадками, располагающимися на уровне выборочных экстремумов.) В этих условиях совпадение экстремальных значений аргументов являлось бы единственным сочетанием, при котором функция достигает экстремума, при всех же других сочетаниях отклонения функции от нормы уменьшались бы. Понятно, что и вероятность превышения композицион-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

ного экстремума оказалась бы в рассмотренном условном случае равной произведению вероятностей аргументов; приближенной выборочной оценкой ее служила бы дробь

$$\frac{1}{n^k},$$

где, как и прежде, n — число лет наблюдений, по которым проводится композиционное построение;

k — число используемых при построении аргументов.

В реальных условиях нет оснований для того, чтобы ограничивать диапазон колебаний метеорологических и гидрологических аргументов композиции экстремальными их значениями, зарегистрированными в период наблюдений. Соответственно, в формировании кривой обеспеченности функции наравне с величинами аргументов, отвечающими периоду наблюдений, участвуют величины, представленные экстремальными — экстраполированными за пределы наблюдений участками кривых обеспеченности аргументов. При таком положении весьма большие и весьма малые величины функции формируются в результате разнообразных сочетаний, в состав которых входят различные комбинации аргументов, в том числе такие, при которых исключительно большие, не наблюдавшиеся в выборке отклонения от нормы одного из аргументов сочетаются с близкими к норме значениями другого. Вследствие этого действительная обеспеченность величины y (исследуемый расход воды), составленной путем сочетания наивысших в выборке величин аргументов $x_1, x_2 \ldots$, всегда больше произведения вероятностей превышения этих экстремумов.

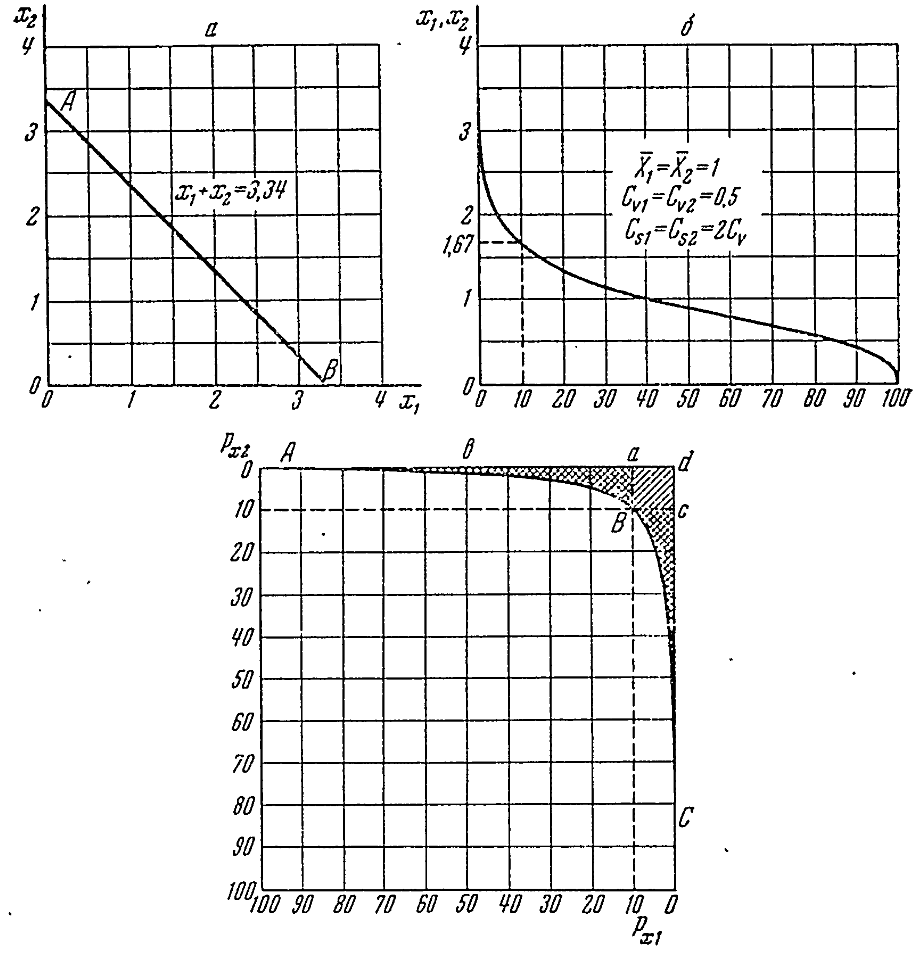
Изложенное можно наглядно иллюстрировать примером. Рассмотрим сумму независимых случайных величин $y = x_1 + x_2$. Положим, что слагаемые x_{1p} и x_{2p} выбраны так, что каждое из них соответствует вероятности превышения (обеспеченности) p, одинаковой для обоих слагаемых. Для наглядности примем в дальнейших рассуждениях $p = 0{,}1 = 10\%$. Обозначим через y_p сумму, составленную из этих значений слагаемых. Исследуем вероятность превышения величины y_p, учитывая, что такая сумма может образоваться не только из величин x_{1p} и x_{2p}, но также и из других сочетаний слагаемых. Нетрудно показать, что вероятность превышения величины y_p не равна произведению $pp = p^2 = 0{,}01 = 1\%$.

Для конкретности допустим, что распределение вероятностей величин x_1 и x_2 одинаково и выражается биномиальной кривой (тип 3 по классификации Пирсона) при параметрах: среднее $\bar{x}_1 = \bar{x}_2 = 1$; стандарт $\sigma_1 = \sigma_2 = 0{,}5$.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Коэффициент асимметрии принимается равным удвоенной величине коэффициента изменчивости. При таком распределении обеспеченности 0,1 соответствуют значения $x_{1p}=x_{2p}=1{,}67$; при этом сумма $y_p=3{,}34$.



Фиг. 4. Вероятность превышения суммы $y=x_1+x_2$

Рассмотрим фиг. 4. График *а* этой фигуры изображает поле координат x_1, x_2. Значению суммы y_p, равной 3,34, соответствует на графике прямая AB, пересекающая оси координат под углом 45°.

График *б* изображает кривую обеспеченности величин x_1 и x_2.

График *в* построен в координатах: p_1 — вероятность превышения (обеспеченность) величин x_1, p_2 — вероятность превышения (обеспеченность) величин x_2. Этот график образует квадрат,

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

стороны которого и площадь равны единице. Сумме y_p, равной 3,34, соответствует на графике *в* линия ABC, координаты которой определяются как обеспеченности слагаемых x_1 и x_2, образующих заданную величину суммы. Так, например, при $x_1=x_2=1,67$; $p_1=p_2=0,10=10\%$; при $p_1=0,5=50\%$, $x_1=0,92$; $x_2=3,34-0,92=2,42$; $p_2=0,013=1,3\%$ и т. д.

Вероятность того, что сумма $y>3,34$, изображается на графике *в* частью площади единичного квадрата, расположенной выше линии ABC. Вероятность того, что оба слагаемых $x_1>$ $>1,67$ и $x_2>1,67$, т. е., что $p_1<0,1$ и $p_2<0,1$, равная $p_1p_2=0,01$, изображается на том же графике заштрихованным квадратом $aBcd$. Нетрудно заметить, что этот квадрат составляет лишь часть площади, изображающей вероятность неравенства $y>3,34$, и, следовательно, меньше этой вероятности. График наглядно показывает также сущность различия между обеспеченностью величины суммы, равной 3,34, и вероятностью совпадения неравенств $p_1<0,1$ и $p_2<0,1$. Площадь, расположенная выше линии ABC, в части, не совпадающей с квадратом $aBcd$, соответствует величинам суммы y, в составе которых одно из слагаемых (x_1 в правой части чертежа и x_2 — в левой) меньше, чем 1,67, т. е. обеспеченность его больше 10%, но зато другое слагаемое превышает 1,67, т. е. обеспеченность его меньше 10%.

Общим выводом из приведенных рассуждений является то, что частота превышения какой-либо (не обязательно экстремальной) величины y в группе, составленной из всех возможных сочетаний наблюдавшихся значений независимых аргументов $x_1, x_2 \ldots$, не может приниматься за оценку вероятности превышения величины y.

* * *

Обратимся к оценке действительного распределения вероятностей величин функции, получаемых в результате совмещения наиболее отклоняющихся от нормы аргументов. Ограничимся при этом случаем двух аргументов, поскольку распространение выводов на любое число их не составляет принципиальных трудностей.

Для решения поставленной задачи необходимо построить и сопоставить между собою кривые обеспеченности: а) наибольших членов выборок, составленных из n^2 независимых наблюдений, и б) наибольших членов выборок, составленных композиционным способом по n наблюдениям за каждым из аргументов.

Эту задачу удобнее всего рассмотреть на конкретном примере.

Положим для простоты, что нами исследуется распределение вероятностей некоторой величины y, представляющей собой

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

сумму двух статистически независимых величин x_1 и x_2, т. е. $y=x_1+x_2$.

Пусть распределение вероятностей исследуемых величин выражается нормальным законом Гаусса и характеризуется параметрами: средние арифметические $\overline{y}=\overline{x}_1=\overline{x}_2=0$; стандарты $\sigma_{x_1}=\sigma_{x_2}=1$; $\sigma_y=\sqrt{2}=1{,}41$.

Примем, что объем выборки, имеющейся по каждому из переменных, составляет $n=50$. Соответственно, число сочетаний аргументов $N=2500$.

Представим себе, что имеется серия выборок случайной величины y с объемом каждой выборки N. Допустим, что в каждой из этих выборок мы отбираем значение y^*_N, самое высокое из составляющих выборку N величин.

Назовем P вероятность того, что наибольшая из N величин y^* обладает обеспеченностью меньшей, чем некоторая величина p. Распределение вероятностей величин y^* и $p(y^*)$ рассмотрено нами в § 1. Как в нем показано, кривая «обеспеченности обеспеченностей» наибольших членов выборок объема N выражается уравнением

$$P=1-(1-p)^N. \qquad (10)$$

С помощью этого уравнения не представляет труда построить кривую $P(p)$, от которой легко перейти к кривой обеспеченности экстремальных величин $P(y^*)$. Для этого с кривой «обеспеченности обеспеченностей» снимают величины p, соответствующие различным значениям P и переходят к величинам y^* по исходной кривой обеспеченности $y(p)$. Кривая $P(y^*)$ является искомой кривой обеспеченности наибольших членов выборок, составленных из N независимых наблюдений (в нашем примере $N=2500$).

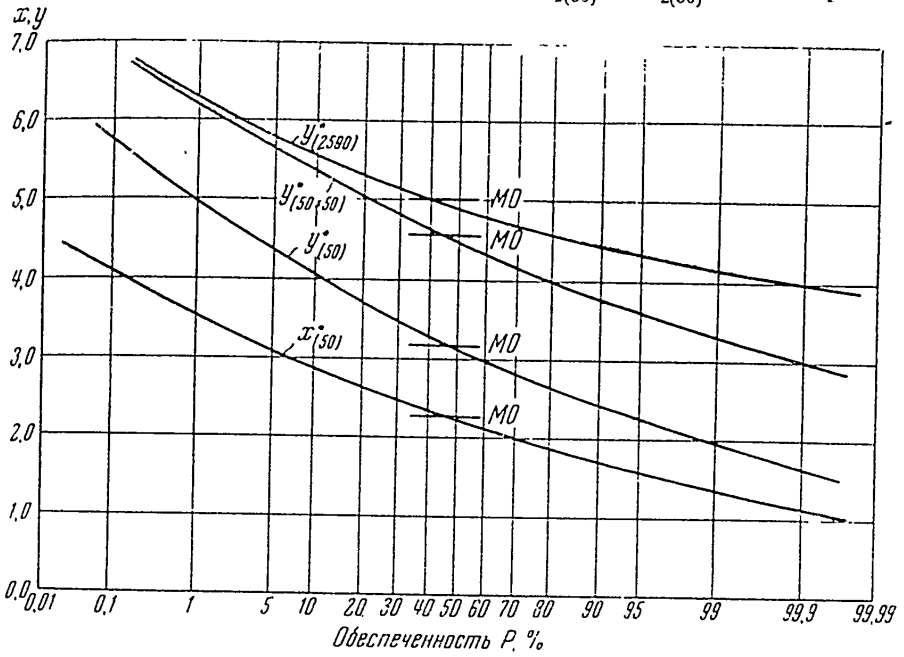
При помощи сходных рассуждений решается и вторая задача — построение кривой обеспеченности наибольших членов выборок, составленных композиционным способом по данным наблюдений за каждым из аргументов (в нашем примере аргументы x_1, $x_2\ldots$, объем каждой из выборок $n=50$).

В этом случае строятся кривые обеспеченности $P(x^*_{1(n)})$ и $P(x^*_{2(n)})$, характеризующие распределение вероятностей наибольших членов выборок каждого из аргументов, рассматриваемых отдельно аналогично тому, как кривая $P(y^*_N)$ характеризует распределение вероятностей наибольших членов в выборках объема N. Искомая кривая обеспеченности сумм $x^*_{1(n)}+x^*_{2(n)}$, наибольших из $n^2=2500$ сочетаний слагаемых, строится путем композиции кривых обеспеченности $P(x^*_{1(n)})$ и $P(x^*_{2(n)})$.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Последовательность расчета и все относящиеся к нему материалы даны в приложении — в таблицах и на графиках. Результатами расчетов явились кривые обеспеченности наибольших членов y^*_{2500} выборок из $N = 2500$ независимых наблюдений и кривые обеспеченности наибольших величин $y^*_{50\times 50}$, полученные композиционным методом, путем суммирования экстремальных значений слагаемых $x^*_{1(50)}$ и $x^*_{2(50)}$. Эти кривые



Фиг. 5. Кривые обеспеченности экстремальных величин $y^*_{(2500)}$, $y^*_{(50\times 50)}$, $y^*_{(50)}$ и $x^*_{(50)}$

изображены на графике фиг. 5. На тот же график наложены для сопоставления кривая обеспеченности величин $y^*_{(50)}$, являющихся наибольшими в составе выборок объемом $n = 50$ и аналогичная кривая x^*_{50}.

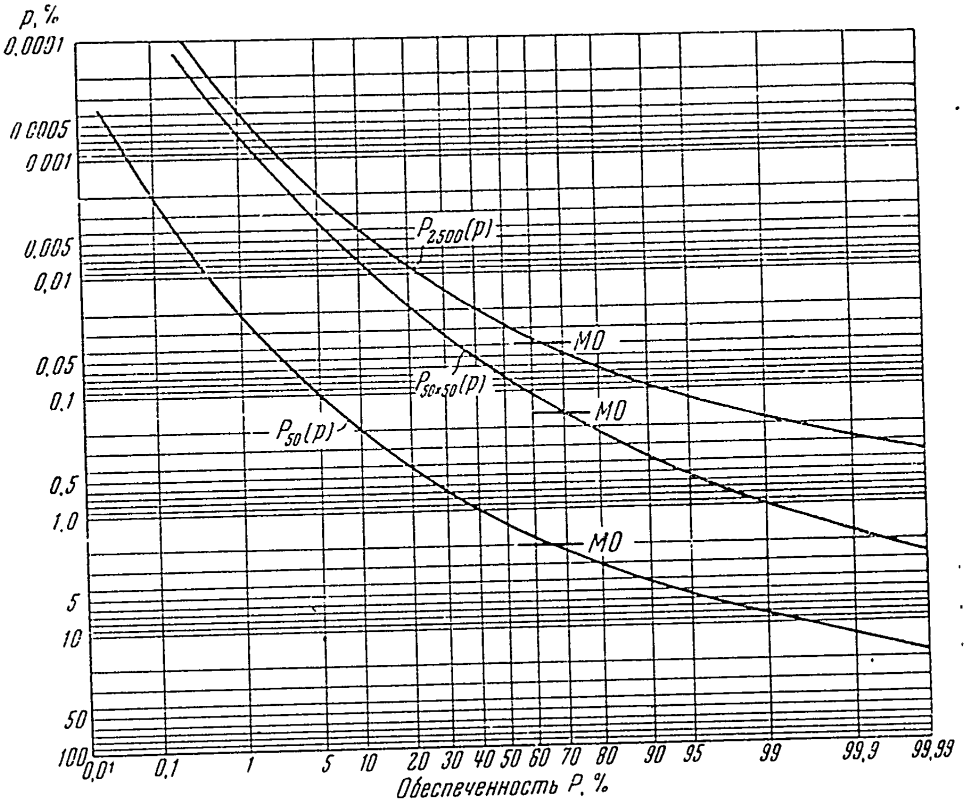
Фиг. 6 изображает три аналогичные кривые обеспеченности обеспеченностей; по оси ординат отложены не величины y, а соответствующие им обеспеченности p.

Графики с полной отчетливостью показывают различие между наибольшим членом композиционной выборки и той величиной, которая соответствует экстремуму, выбранному из N независимых наблюдений. Так, в рассмотренном примере математическое ожидание величины $y^*_{(2500)}$ равно 5,00, в то время как математическое ожидание величины $y^*_{(50\times 50)}$

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

равно 4,55. Подобным же образом математическое ожидание обеспеченности $\overline{p}_{(2500)}$ равно 0,04%, а математическое ожидание обеспеченности $\overline{p}_{(50\times50)}=0,16\%$. Иными словами, обеспеченность величин, полученных в результате комбинирования аргументов, нельзя оценивать непосредственно по числу сочетаний, равному n^2. Эта обеспеченность подчиняется дру-



Фиг. 6. Кривые обеспеченности обеспеченностей $P_{(2500)}(p)$, $P_{(50\times50)}(p)$ и $P_{(50)}(p)$

гому закону распределения вероятностей, причем математическое ожидание обеспеченности наибольшего члена композиционной выборки существенно превышает величину $\frac{1}{n^2}$. Таким образом, приписывая композиционному экстремуму эту вероятность превышения, мы вводим систематическую ошибку, идущую не в запас надежности расчета.

* * *

Проведенные исследования относятся к случаю, когда оба слагаемые x_1 и x_2 характеризуются одинаковыми кривыми

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

обеспеченности нормального типа со стандартами, равными единице. Если влияние, оказываемое на колебания величины y, распределено между слагаемыми x_1 и x_2 неравномерно, то отклонение экстремального члена композиционной выборки от величины y_N^* оказывается еще более значительным. Так, композиционное построение, проведенное в изложенном выше порядке для случая $\sigma_{x_1}=1$, $\sigma_{x_2}=0,5$, показало, что математическое ожидание обеспеченности $\overline{p}_{(50\times50)}=0,27\%$ (по сравнению с указанной выше величиною $0,16\%$, соответствующей случаю $\sigma_{x_1}=\sigma_{x_2}$).

Путем аналогичных рассуждений можно показать, что корреляционная связь между слагаемыми x_1 и x_2 уменьшает размах отклонения от нормы композиционного экстремума $y^*_{(n\times n)}$: чем теснее связь, тем больше отличается математическое ожидание обеспеченности наибольшего члена композиционной выборки от величины $\frac{1}{n^2}$. Очевидно, при коэффициенте корреляции, стремящемся к единице, это ожидание стремится к $\frac{1}{n}$.

* * *

Выводы проделанного исследования таковы.

а) Экстремальный член $y^*_{(n\times n)}=x^*_{1(n)}+x^*_{2(n)}$ комбинированной выборки, составленной из $(n\times n)$ сочетаний слагаемых, характеризует величины сумм, более редко повторяющиеся, чем экстремальный член $y^*_{(n)}$ непосредственной выборки объема n; таким образом, композиционный метод в принципе увеличивает возможности суждения о редко наблюдающихся явлениях.

б) При заданном объеме наблюдений за слагаемыми x_1 и x_2 экстремальный член комбинированной выборки характеризует тем более редкие события, чем меньше различаются по величине стандарты σ_{x_1} и σ_{x_2}, т. е. чем более равноценны использованные для композиции аргументы в отношении влияния их на изучаемую гидрологическую характеристику.

в) Изложенные выводы относятся к композиционным построениям, проводимым со статистически независимыми аргументами. Стохастическая связь между аргументами понижает эффективность композиции.

г) Математическое ожидание экстремума $y^*_{(n\times n)}$ комбинированной выборки из $n\times n$ членов меньше (ближе к норме), чем математическое ожидание экстремума из n^2 непосред-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

ственных наблюдений. Отождествлять обеспеченности этих величин, что иногда допускается в исследованиях, нельзя.

д) Суждение о распределении вероятностей экстремальных членов комбинированной выборки может быть получено путем построения соответствующих кривых обеспеченности методом, изложенным в настоящей работе. При оценке достоверности выводов указанного построения следует помнить, что эти выводы неразрывно связаны с исходными положениями расчета: с допущением статистической независимости аргументов и с принятием определенного вида связи между ними и изучаемой гидрологической величиной.

Более подробному анализу вопроса об условиях применения и эффективности композиционного метода мы предполагаем посвятить специальное исследование.

Приложение к § 2

ПРИМЕР ПОСТРОЕНИЯ КРИВЫХ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ НАИБОЛЬШИХ ЧЛЕНОВ ВЫБОРОК, СОСТАВЛЕННЫХ: 1) ИЗ НЕЗАВИСИМЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И 2) КОМПОЗИЦИОННЫМ СПОСОБОМ

1. Композиционное построение проводится на основе зависимости

$$y = x_1 + x_2,$$

где x_1 и x_2 — статистически независимые величины, распределение вероятностей которых подчиняется нормальному закону.

Параметры случайных величин принимаются равными:

$$\bar{y} = \bar{x}_1 = \bar{x}_2 = 0,$$

$$\sigma_{x_1} = \sigma_{x_2} = 1,$$

$$\sigma_y = \sqrt{2} = 1{,}41.$$

Таблица 4

p, %	$x_1 = x_2$	y	p, %	$x_1 = x_2$	y	p, %	$x_1 = x_2$	y
0,0001	4,74	6,70	3,0	1,88	2,66	97,0	—1,88	—2,66
0,005	4,42	6,25	5,0	1,64	2,32	99,0	—2,33	—3,29
0,001	4,26	6,02	10,0	1,28	1,81	99,9	—3,09	—4,37
0,005	3,89	5,50	25,0	0,67	0,95	99,99	—3,72	—5,26
0,01	3,72	5,26	50,0	0,00	0.00	99,999	—4,26	—6,02
0,05	3,29	4,65	75,0	—0,67	—0,95	99,9999	—4,74	—6,70
0,1	3,09	4,37	90,0	—1,28	—1,81			
1,0	2,33	3,29	95,0	—1,64	—2,32			

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

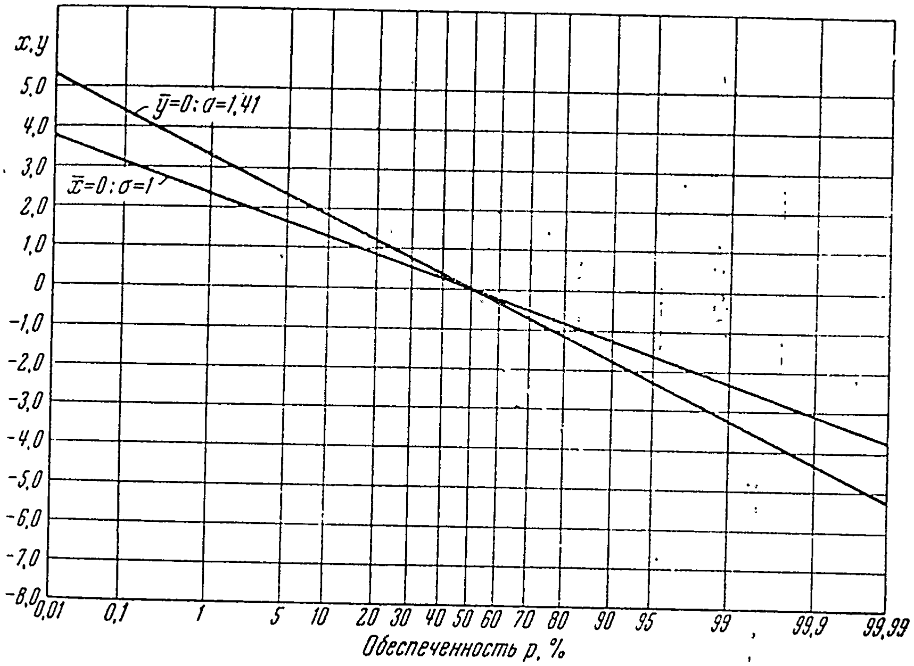
Координаты кривых обеспеченности величин x и y представлены в табл. 4, а сами кривые на фиг. 7.

2. Строятся кривые обеспеченности обеспеченностей наибольших членов выборок объемом $n=50$ и $n=2500$. Для этого применяется формула

$$P_n = 1 - (1 - p)^n.$$

Здесь P_n — обеспеченность обеспеченности p наибольшего члена выборки среди множества выборок, каждая из которых имеет объем n;

p — обеспеченность наибольшего члена выборки, оцениваемая по исходной кривой обеспеченности.



Фиг. 7. Кривые обеспеченности x и y

Порядок вычисления P_n для $n=50$ дан в качестве примера в табл. 5 (вычисление производилось при помощи семизначных логарифмов).

Кривые обеспеченности обеспеченностей для $n=50$ и $n=2500$ представлены на фиг. 6.

3. Кривые обеспеченности обеспеченностей, построенные по п. 2, перестраиваются в кривые обеспеченности экстремальных величин $x^*_{(50)}$, $y^*_{(2500)}$, а также $y^*_{(50)}$. Для этого взамен каждой ординаты p подставляются величины x и y, снимаемые с кривых обеспеченности табл. 4 (или фиг. 7).

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Таблица 5

p		$1-p$	$\lg(1-p)$	$n = 50$			
				$50\lg(1-p)$	$(1-p)^{50}$	P	
в %	в долях единицы					в долях единицы	в %
0,0005	0,000005	0,999995	$\bar{1}$,99999785	$\bar{1}$,9998925	0,99975	0,00025	0,025
0,001	0,00001	0,99999	$\bar{1}$,9999957	$\bar{1}$,999785	0,99951	0,00049	0,049
0,005	0,00005	0,99995	$\bar{1}$,9999783	$\bar{1}$,998915	0,99750	0,0025	0,25
0,01	0,0001	0,9999	$\bar{1}$,9999566	$\bar{1}$,99783	0,99502	0,00498	0,50
0,05	0,0005	0,9995	$\bar{1}$,9997828	$\bar{1}$,98914	0,97530	0,0247	2,47
0,1	0,001	0,999	$\bar{1}$,9995655	$\bar{1}$,978275	0,95121	0,04879	4,88
0,2	0,002	0,998	$\bar{1}$,9991305	$\bar{1}$,956525	0,90474	0,09526	9,53
0,3	0,003	0,997	$\bar{1}$,9986952	$\bar{1}$,934760	0,86052	0,13948	13,95
0,4	0,004	0,996	$\bar{1}$,9982593	$\bar{1}$,912965	0,81840	0,18160	18,16
0,5	0,005	0,995	$\bar{1}$,9978231	$\bar{1}$,891155	0,77831	0,22169	22,17
1,0	0,01	0,99	$\bar{1}$,9956352	$\bar{1}$,781760	0,60501	0,39499	39,50
3,0	0,03	0,97	$\bar{1}$,9867717	$\bar{1}$,338585	0,21806	0,78194	78,19
5,0	0,05	0,95	$\bar{1}$,9777236	$\bar{2}$,886180	0,076945	0,923055	92,31
10,0	0,10	0,90	$\bar{1}$,9542425	$\bar{3}$,712125	0,0051538	0,9948462	99,48
15,0	0,15	0,85	$\bar{1}$,9294189	$\bar{4}$,470945	0,00029576	0,99970424	99,97
20,0	0,20	0,80	$\bar{1}$,9030900	$\bar{5}$,154500	0,0000143	0,9999857	99,999

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Для примера в табл. 6 дан порядок вычисления $x^*_{(50)}$ и $y^*_{(50)}$.

Кривые обеспеченности экстремальных величин $x^*_{(50)}$, $y^*_{(2500)}$ и $y^*_{(50)}$ даны на фиг. 5.

Таблица 6

P, %	p, %	$x^*_{(50)}$	$y^*_{(50)}$	P, %	p, %	$x^*_{(50)}$	$y^*_{(50)}$
0,025	0,0005	4,42	6,25	18,16	0,4	2,67	3,78
0,049	0,001	4,26	6,02	22,17	0,5	2,58	3,65
0,25	0,005	3,89	5,50	39,499	1,0	2,33	3,29
0,50	0,01	3,72	5.26	78,194	3,0	1,88	2,66
2,47	0,05	3,29	4,65	92,31	5,0	1,64	2,32
4,88	0,1	3,09	4,37	99,48	10,0	1,28	1,81
9,525	0,2	2,90	4,11	99,97	15,0	1,15	1,63
13,95	0,3	2,74	3.88	99,999	20,0	0,84	1,19

4. Проводится композиция кривых обеспеченности экстремальных величин $x^*_{1\,(50)}$ и $x^*_{2\,(50)}$, построенных по п. 3. Для этого выполняются следующие последовательные операции:

а) одна из кривых обеспеченности $x^*_{1(50)}$ или $x^*_{2\,(50)}$ (при принятых исходных положениях обе кривые одинаковы) принимается за основную;

б) определяются величины $x^*_{(50)}$, соответствующие характерным значениям обеспеченности; эти величины, снятые с фиг. 5, выписаны в первую горизонтальную и вертикальную строки табл. 7;

в) каждая из указанных величин суммируется с кривой обеспеченности $x^*_{(50)}$ и по результатам суммирования строятся частные кривые обеспеченности сумм $x^*_{(50)} + x^*_{(50)}$. Такое суммирование дано в табл. 7, полученные частные кривые сумм представлены на фиг. 8;

г) с сетки частных кривых фиг. 8 снимаются ординаты кривых обеспеченности обеспеченностей, соответствующие определенным значениям сумм $x^*_{(50)} + x^*_{(50)}$. Эти ординаты для серии сумм выписаны в табл. 8 (на фиг. 8 для значения суммы 6,0 показан порядок снятия с частных кривых величин P, выписанных в табл. 8);

д) цифры табл. 8 служат для построения кривых обеспеченности обеспеченностей. Эти кривые изображаются на чертеже (фиг. 9) и планиметрируются. Результаты планиметрирования определяют искомую обеспеченность сумм $x^*_{(50)} + x^*_{(50)}$.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Таблица 7

p	p	0,05	0,1	0,5	1	3	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	97	99	99,9
	x_2 \ x_1	4,26	4,09	3,70	3.54	3,22	3,07	2,84	2,60	2,46	2,33	2,20	2,10	1,99	1,84	1,70	1,58	1,50	1,37	1,13
0,05	4,26	8,52	8,35	7,96	7,80	7,48	7,33	7,10	6,86	6,72	6,59	6,46	6,36	6,25	6,10	5,96	5,84	5,76	5,63	5,39
0,1	4,09	8,35	8,18	7,79	7,63	7,31	7,16	6,93	6,69	6,55	6,42	6,29	6,19	6,08	5,93	5,79	5,67	5,59	5,46	5,22
0,5	3,70	7,96	7,79	7,40	7,24	6,92	6,77	6,54	6,30	6,16	6,03	5,90	5,80	5,69	5,54	5,40	5,28	5,20	5,07	4,83
1.0	3,54	7,80	7,63	7,24	7,08	6,76	6,61	6,38	6,14	6,00	5,87	5,74	5,64	5,53	5,38	5,24	5,12	5,04	4 91	4,67
3,0	3,22	7,48	7,31	6,92	6,76	6,44	6,29	6,06	5,82	5,68	5,55	5,42	5,32	5,21	5,06	4,92	4,80	4,72	4,59	4,35
5,0	3,07	7,33	7,16	6,77	6,61	6,29	6,14	5,91	5,67	5,53	5,40	5,27	5,17	5,06	4,91	4,77	4,65	4,57	4,44	4,20
10	2,84	7,10	6,93	6,54	6,38	6,06	5,91	5,66	5,44	5,30	5,17	5,04	4,94	4,83	4,68	4,54	4,42	4,34	4,21	3,97
20	2,60	6,86	6,69	6,30	6,14	5,82	5,67	5,44	5,20	5,04	4,93	4,80	4,70	4,59	4,46	4,30	4,18	4,10	3,97	3,73
30	2,46	6,72	6,55	6,16	6,00	5,68	5,53	5,30	5,04	4,92	4,79	4,66	4,56	4,45	4,30	4,16	4,04	3,96	3,83	3,59
40	2,33	6,59	6,42	6,03	5,87	5,55	5,40	5,17	4,93	4,79	4,66	4,53	4,43	4,32	4,17	4,03	3,91	3,83	3,70	3,46
50	2,20	6,46	6,29	5,90	5,74	5,42	5,27	5,04	4,80	4,66	4,53	4,40	4,30	4,19	4,04	3,90	3,78	3,70	3,57	3,33
60	2,10	6,36	6,19	5,80	5,64	5,32	5,17	4,94	4,70	4,56	4,43	4,30	4,20	4,09	3,94	3,80	3,68	3,60	3,47	3,23
70	1,99	6,25	6,08	5,69	5,53	5,21	5,06	4,83	4,59	4,45	4,32	4,19	4,09	3,98	3,83	3,69	3,57	3,49	3,36	3,12
80	1,84	6,10	5,93	5,54	5 38	5,06	4,91	4,68	4,46	4,30	4,17	4,04	3,94	3,83	3,68	3,54	3,42	3,34	3,21	2,97
90	1,70	5,96	5,79	5,40	5,24	4,92	4,77	4,54	4,30	4,16	4,03	3,90	3,80	3,69	3,54	3,40	3,28	3,20	3,07	2,83
95	1,58	5,84	5,67	5,28	5,12	4,80	4,65	4,42	4,18	4,04	3,91	3,78	3,68	3,57	3,42	3,24	3,16	3,08	2,95	2,71
97	1,50	5,76	5,59	5,20	5,04	4,72	4,57	4,34	4,10	3,96	3,83	3,70	3,60	3,49	3,34	3,20	3,08	3,00	2,87	2,63
99	1,37	5,63	5,46	5,07	4,91	4,59	4,44	4,21	3,97	3,86	3,70	3,57	3,47	3,36	3,21	3,07	2,95	2,87	2,74	2,50
99,9	1,13	5,39	5,22	4,83	4,67	4,35	4,20	3,97	3.73	3,59	3,46	3,33	3,23	3,12	2,97	2,83	2,71	2,63	2,50	2,26

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

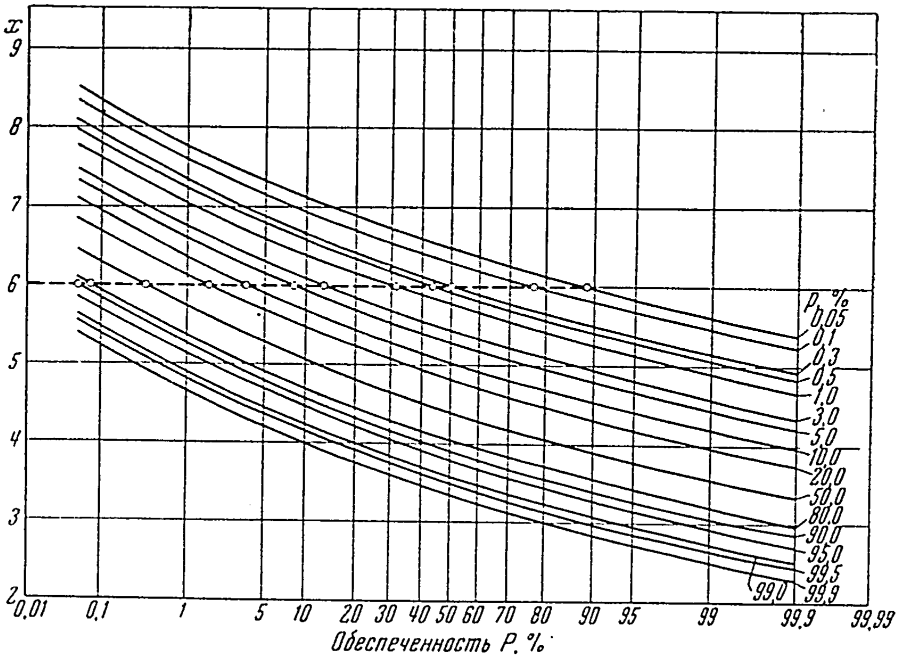
Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Таблица 8

x_1+x_2 \ p частная	99,9	99,5	99,0	95,0	90,0	80,0	50,0	20,0	10,0	5,0	3,0	1,0	0,5	0,3	0,1	0,05
2,5	99	99,75	99,9													
3,0	78,0	88,3	93,5	98,4	99,4	99,85										
3,5	35,0	50,0	58,0	75,0	84,0	93,4	99,4									
4,0	9,5	16,0	19,5	32,0	42,0	54,0	84,0	98,5	99,85							
4,5	1,7	3,0	4,0	8,7	12,0	17,0	40,0	77,0	92,2	98,5	99,5					
5,0	0,26	0,5	0,7	1,7	2,56	3,8	11,5	36,0	53,0	76,0	87,0	98,0	99,4	99,78		
5,5	—	0,06	0,08	0,25	0,40	0,6	2,4	9,0	16,5	31,0	44,0	74,0	85,0	90,0	98.5	99,6
6,0					0,05	0,08	0,35	1,7	3,7	8,2	13,0	31,0	44,0	50,0	77,0	89,0
6,5							0,04	0,22	0,6	1,5	2,5	6,6	12,5	15,5	33,0	48,0
7,0								0,03	0,08	0,2	0,37	1,2	2,5	3,5	8,0	14,0
7,5											0,045	0,17	0,36	0,59	1,4	2,7
8,0													0,04	0,07	0,2	0,35

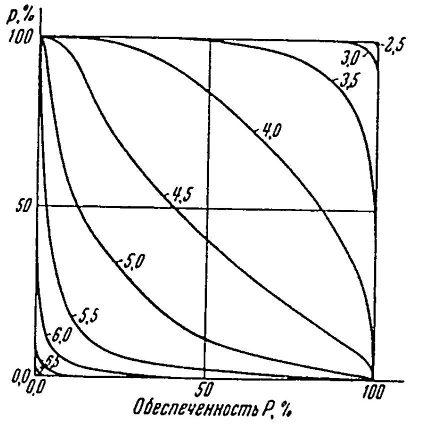
Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2



Фиг. 8. Частные кривые сумм $\overset{*}{x}_{(50)}+\overset{*}{x}_{50}$

При желании получить большую точность выводов количество частных кривых обеспеченности фиг. 8 надо было бы увеличить — соответственно возросло бы число точек для построения результирующих кривых фиг. 9. Для достижения высокой точности планиметрирования построение фиг. 9 следует выполнять в достаточно крупном масштабе, различном для разных значений суммы.



Фиг. 9. Кривые обеспеченности обеспеченностей

Выводы расчета сведены в табл. 9.

Результирующая кривая обеспеченности сумм экстремумов показана на фиг. 5.

е) Эта кривая перестраивается в кривую обеспеченности обеспеченностей, для чего каждая величина ординаты $x^*_{(50)} + x^*_{(50)}$ заменяется величиной обеспеченности, соответствующей ей по кривой $\bar{y}=0$, $\sigma_y=1{,}41$ (см. п. 1) (табл. 4, фиг. 7). Кривая нанесена на фиг. 6.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Таблица 9

$x^*_{(50)} + x^*_{(50)}$	7,0	6,5	6,0	5,5	5,0	4,5	4,0	3,5	3,0
P, %	0,06	0,35	1,9	7,0	21	48	78	97,0	99,9

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Н. Крицкий, М. Ф. Менкель. Об оценке вероятностей превышения наблюденных расходов воды. Научный отчет Секции по научной разработке проблем водного хозяйства Академии наук СССР, 1947.
2. С. Н. Крицкий, М. Ф. Менкель. О соответствии теоретических кривых распределения вероятностей данным наблюдений по речному стоку. Проблемы регулирования речного стока, вып. 3. Изд. АН СССР, 1948.
3. С. Н. Крицкий, М. Ф. Менкель. Гидрологические основы речной гидротехники. Изд. АН СССР, 1950.
4. С. Н. Крицкий, М. Ф. Менкель. Расчеты речного стока, 1934.
5. E. J. Gumbel. Statistical Analysis in Hydrology. Proceedings of American Society of Civil Engineers, 1943.
6. S. S. Wilks. Determination of samples sizes for setting tolerance limits. The Annales of mathematical statistics, v. XII, 1941.
7. А. Н. Колмогоров. Определение центра рассеивания и меры точности по ограниченному числу наблюдений. Изв. Академии наук СССР (серия математическая), т. 6, № 1—2, 1942.
8. М. А. Великанов. Композиционный метод нахождения кривой распределения для пиковых расходов снегового половодья. Метеорология и гидрология, № 3, 1949.
9. В. Н. Паршин. Расчет повторяемости весеннего стока на основе анализа его формирования. Метеорология и гидрология, № 9, 1953.
10. Г. П. Калинин и З. И. Дарман. Расчет повторяемости гидрологических явлений на основе анализа их формирования. Метеорология и гидрология, № 1, 1953.
11. Г. А. Алексеев. Генетико-статистический метод определения вероятных максимальных расходов воды. Тр. Гос. гидрологического ин-та, вып. 43 (97), 1954.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

С. Н. КРИЦКИЙ, М. Ф. МЕНКЕЛЬ

О ДВОЯКООГРАНИЧЕННОЙ КРИВОЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ И ПРИМЕНЕНИИ ЕЕ К ГИДРОЛОГИЧЕСКИМ РАСЧЕТАМ

В практике гидрологических и водохозяйственных расчетов иногда приходится исследовать распределения вероятностей величин, колебания которых ограничиваются некоторым конечным интервалом. Примером могут служить колебания коэффициентов стока, которые при полном учете поступающей на водосбор воды физически не могут выходить за границы интервала $0<\eta<1$. С построением кривых распределения вероятностей подобного рода мы встречаемся в отдельных случаях композиционного анализа. В сходном положении находятся колебания стока межени или стока половодья, выраженные в долях годового стока, объем которого принимается за единицу. И в этом случае доля годового стока, приходящаяся на рассматриваемую фазу, физически не может выходить за границы интервала $0<x<1$. С подобными построениями мы сталкиваемся в расчетах водохранилищ сезонного регулирования стока.

Для изображения таких колебаний распространенные в гидрологических исследованиях биномиальные кривые, неограниченные сверху, непригодны. Должен быть разработан специальный тип функций распределения вероятностей, удовлетворяющий поставленным условиям. При построении таких функций могут применяться те же биномиальные кривые, если допустить, что ими выражается распределение вероятностей логарифмов исследуемых величин.

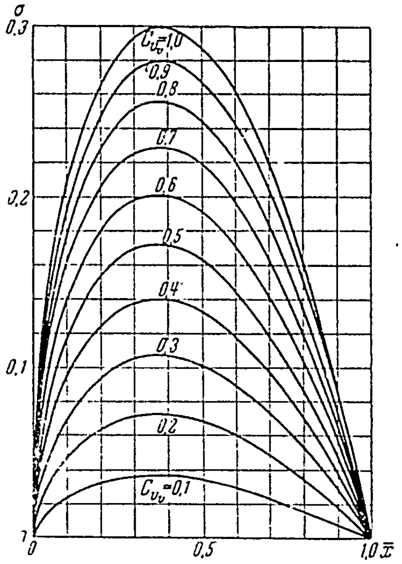
Положим, что рассматриваемая нами переменная связана равенством $x=e^{-Av}$ с некоторой переменной v, колебания которой выражаются биномиальной кривой при закрепленном центре распределения $\bar{v}=1$ и свободно выбираемом коэффициенте изменчивости C_{v_v} (коэффициент асимметрии принимается равным удвоенному значению коэффициента изменчивости).

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Нетрудно заметить, что переменная x, удовлетворяющая этому условию, колеблется в интервале $0 < x < 1$, чему соответствует интервал $-\infty < \ln x < 0$.

При построении кривых обеспеченности величин v мы имеем возможность назначать произвольно два параметра исходной кривой: коэффициент изменчивости C_{v_v} и переходный множитель A. Соответствующим образом выбирая значения этих величин, мы можем подобрать их сочетание так, чтобы искомое распределение вероятностей переменной $\bar{x}$ удовлетворяло заданным значениям каких-либо двух параметров. За такие параметры мы примем, во-первых, среднюю арифметическую величину переменной $\bar{x}$ (например, средняя за многолетний период доля годового стока, приходящаяся на период половодья, и т. п.) и, во-вторых, стандартное отклонение σ ежегодных значений x от их среднего. Между параметрами $\bar{x}$ и σ как аргументами и C_{v_v} и A как функциями существует зависимость, выражаемая номограммами, которые представлены на фиг. 1 и 2. (Номограмма фиг. 2 могла бы служить для определения обоих параметров C_{v_v} и A. Мы помещаем, однако, также номограмму фиг. 1, так как она обеспечивает повышенную точность интерполяции величин C_{v_v}).



Фиг. 1. Зависимости $C_v = C_{v_v}(\bar{x}, \sigma)$

Номограммы дают возможность определить значения параметров A и C_{v_v} по заданным $\bar{x}$ и σ. По C_{v_v} строится обычная кривая обеспеченности биномиального типа с $C_{s_v} = 2C_{v_v}$, $\bar{v} = 1$. Это кривая обеспеченности v. Переход от v к переменной x осуществляется по уравнению: $\lg x = -Av$ (множитель, необходимый для перевода натуральных логарифмов в десятичные, введен при построении номограммы в величины A).

Вероятности превышения исходной кривой (p_v) заменяются при переходе к переменной x дополнениями до 100%, т. е.

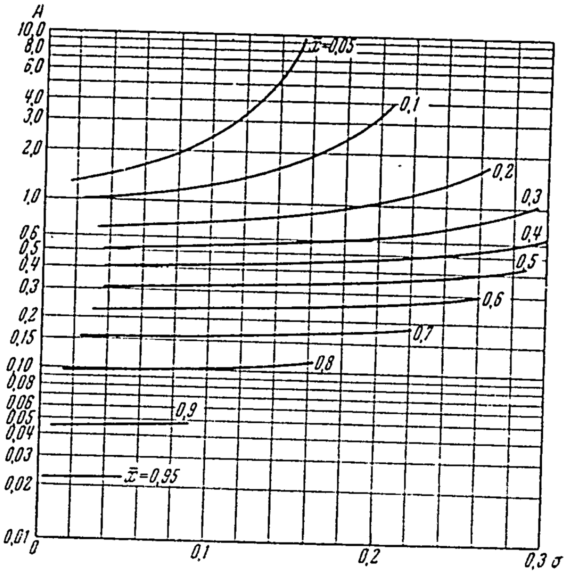
$$100 p_x = 100(1 - p_v).$$

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

В тех случаях, когда верхняя граница колебания исследуемой величины $x_в$ не равна единице, построение производится для приведенных значений, равных $\frac{x}{x_в}$, и ординаты кривой умножаются на коэффициент, равный $x_в$.

Рассматриваемый тип ограниченных кривых распределения вероятностей сходен с одним из типов, предложенных С. И. Рыбкиным [1]. Различие заключается в системе параметров. Нами оцениваются непосредственно параметры колебания



Фиг. 2. Зависимости $A=A(\bar{x}, \sigma)$

величин x, в работе же С. И. Рыбкина выборочной оценке подвергаются параметры колебания $\lg x$. Параметры, непосредственно характеризующие колебания исследуемых величин, более тесно связаны с природой изучаемых явлений и потому более наглядны, чем параметры колебания логарифмов.

Следует отметить, что применимость рассматриваемого типа кривых обеспеченности к изображению колебаний стока фаз, выраженного в долях годового стока, так же как и других аналогичных гидрологических характеристик, требует специального доказательства, основанного на анлизе материалов наблюдений. Однако тот факт, что мы закрепляем четыре параметра искомой кривой — нижнюю границу $x_н$, верхнюю границу $x_в$, центр распределения $\bar{x}$ и стандарт σ, — дает основания предполагать, что область соответствия функций рас-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

смотренного типа эмпирическому материалу окажется достаточно широкой.

* * *

Приведем некоторые математические выводы, обосновывающие номограммы фиг. 1 и 2.

Примем, что

$$x = e^{-Av}, \tag{1}$$

где e — основание натуральных логарифмов;

v — некоторая переменная, распределенная по биномиальной кривой;

A — параметр.

При $v = 0$ $x = 1$; при $v = \infty$, $x = 0$.

Пусть уравнение кривой распределения v имеет вид

$$u = \frac{\gamma^\gamma}{\Gamma(\gamma)} \cdot e^{-\gamma v} \cdot v^{\gamma-1}, \tag{2}$$

где $\gamma = \frac{1}{C^2_{v_v}}$ — параметр.

В таком случае $y = u\frac{dv}{dx}$.

Начальные моменты ν_k порядка k распределения $y = \varphi(x)$ выражаются уравнением:

$$\nu_k = \int_0^\infty yx^k dx = \int_0^\infty u \frac{dv}{dx} x^k dx.$$

Заметим, что

$$v = -\frac{1}{A}\ln x; \quad \frac{dv}{dx} = -\frac{e^{Av}}{A},$$

$$x^k = e^{-Akv}; \quad dx = -Ae^{-Av}dv.$$

После подстановки получим:

$$\nu_k = \int_0^\infty u\left(-\frac{e^{Av}}{A}\right) \cdot e^{-Akv} \cdot (-Ae^{-Av})\,dv =$$

$$= \frac{\gamma^\gamma}{\Gamma(\gamma)} \int_0^\infty e^{-v(\gamma+Ak)} \cdot v^{\gamma-1} \cdot dv.$$

Интеграл, входящий в правую часть уравнения, может быть преобразован следующим образом:

$$\int_0^\infty e^{-v(\gamma+Ak)} \cdot v^{\gamma-1} \cdot dv = \frac{\Gamma(\gamma)}{(\gamma+Ak)^\gamma}.$$

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

В результате получаем

$$\nu_k = \frac{\gamma^\gamma}{(\gamma + Ak)^\gamma} \cdot \qquad (3)$$

Подстановка $k=0$ приводит к значению $\nu_0 = 1$, как и должно быть.

Для того чтобы привести рассматриваемую кривую к заданным значениям параметров $\bar{x}$ и σ, мы должны определенным образом задаться значениями первых двух начальных моментов: $\nu_1 = \bar{x}$; $\nu_2 = \sigma^2 + \bar{x}^2$ (так как $\mu_2 = \nu_2 - \nu_1^2$, где μ_2 — второй центральный момент).

Используя полученное выше выражение (3), получаем

$$\frac{\gamma^\gamma}{(\gamma + A)^\gamma} = \bar{x}, \qquad (4)$$

$$\frac{\gamma^\gamma}{(\gamma + 2A)^\gamma} = \sigma^2 + \bar{x}^2. \qquad (5)$$

Система уравнений выражает зависимость между параметрами σ и $\bar{x}$ распределения вероятностей величин, колеблющихся в интервале $0 < x < 1$ и параметрами A и γ исходной биномиальной кривой. Необходимо привести эти зависимости к форме номограмм $A = A(\bar{x}, \sigma)$ и $\gamma = \gamma(\bar{x}, \sigma)$.

Для построения номограмм исключим переменную A. Получим уравнение

$$\bar{x}^{\frac{1}{\gamma}} + \bar{x}^{\frac{1}{\gamma}} (\sigma^2 + \bar{x}^2)^{\frac{1}{\gamma}} - 2(\sigma^2 + \bar{x}^2)^{\frac{1}{\gamma}} = 0. \qquad (6)$$

Это уравнение удобно решать в описываемом ниже порядке: задается значение $\gamma = \frac{1}{C_{v_v}^2}$ или $\frac{1}{\gamma} = C_{v_v}^2$ (где C_{v_v} — коэффициент изменчивости биномиальной кривой); далее задается серия значений $\bar{x}$ и путем решения уравнения (6) отыскиваются соответствующие значения σ. Получается серия величин $\bar{x}$, C_{v_v} (круглые цифры) и σ — (некруглые цифры). Номограмма строится в координатах $\bar{x}$, σ с нанесением серии кривых $C_{v_v} = \text{const}$. После построения номограммы $C_{v_v} = C_{v_v}(\bar{x}, \sigma)$ для тех же значений γ и x, для которых найдены значения σ, определяются величины

$$A = \frac{\gamma\left(1 - x^{\frac{1}{\gamma}}\right)}{x^{\frac{1}{\gamma}}} \cdot$$

В результате строится номограмма: $A = A(\bar{x}, \sigma)$.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

* * *

Приведем числовой пример, иллюстрирующий применение рассмотренного выше типа двоякоограниченных кривых обеспеченности.

Примем за единицу средний объем годового стока, как обычно при водохозяйственных расчетах, т. е. положим, что $\overline{\Gamma}=1$; пусть $C_{v\Gamma}=0{,}32$. Поскольку $\overline{\Gamma}=1$, постольку той же величине равен стандарт $\sigma_{\Gamma}=0{,}32$.

Пусть средняя доля стока половодья составляет $\overline{\Pi}=0{,}6$ при $C_{v\Pi}=0{,}5$, т. е. стандарт $\sigma_{\Pi}=0{,}6\times 0{,}5=0{,}3$.

Средняя доля стока межени $\overline{М}=0{,}4$ при $C_{vМ}=0{,}25$, т. е. стандарт $\sigma_{М}=0{,}4\times 0{,}25=0{,}10$.

Построим условные кривые обеспеченности стока межени и стока половодья, отвечающие двум вариантам годового стока — $\Gamma=0{,}7$ и $\Gamma=1{,}5$, и сравним эти кривые с соответствующими безусловными кривыми.

Исходные безусловные кривые обеспеченности объемов стока половодья, межени и года могут быть построены, пользуясь обычными таблицами координат биномиальных кривых.

Установим значения коэффициента корреляции $r_{\Pi М}$ между стоком половодья и следующей за ним меженн. Заметим, что между параметрами колебаний стока этих фаз существует следующее соотношение:

$$\sigma_{\Gamma}^2=\sigma_{\Pi}^2+\sigma_{М}^2+2r_{\Pi М}\sigma_{\Pi}\sigma_{М}.$$

Этим соотношением можно пользоваться для оценки $r_{\Pi М}$, не прибегая к непосредственному вычислению:

$$r_{\Pi М}=\frac{(\overline{\Gamma}\cdot C_{v\Gamma})^2-(\overline{\Pi}\cdot C_{v\Pi})^2-(\overline{М}\cdot C_{vМ})^2}{2\overline{\Pi}C_{v\Pi}\overline{М}C_{vМ}}.$$

В нашем случае

$$r_{\Pi М}=\frac{0{,}32^2-(0{,}6\cdot 0{,}5)^2-(0{,}4\cdot 0{,}25)^2}{2\cdot 0{,}6\cdot 0{,}5\cdot 0{,}4\cdot 0{,}25}=0.$$

Найдем общее выражение параметров условной кривой обеспеченности стока половодья, воспользовавшись для этого выражениями коэффициента корреляции между суммой и слагаемым (см. приложение 1) и параметров условной кривой обеспеченности слагаемого при заданной величине суммы (см. приложение 2).

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Согласно уравнению (3) приложения 2 условная средняя

$$\overline{\Pi}(\Gamma) = \overline{\Pi} + \frac{\sigma_{\Pi}^2}{\sigma_{\Gamma}^2}(\Gamma - \overline{\Gamma}) = 0{,}6 + 0{,}9(\Gamma - \overline{\Gamma}).$$

Согласно уравнению (4) того же приложения условный стандарт

$$\sigma_{\Pi(\Gamma)} = \frac{\sigma_{\Pi}\sigma_{M}}{\sigma_{\Gamma}} = \frac{0{,}3 \cdot 0{,}1}{0{,}32} = 0{,}095.$$

Подставляя заданные в качестве условия варианты годового стока, получаем следующие значения параметров условных кривых обеспеченности:

при $\Gamma = 0{,}7$

$$\overline{\Pi}(0{,}7) = 0{,}6 + 0{,}9\,(0{,}7 - 1{,}0) = 0{,}33;$$

при $\Gamma = 1{,}5$

$$\overline{\Pi}(1{,}5) = 0{,}6 + 0{,}9\,(1{,}5 - 1{,}0) = 1{,}05.$$

Подобным же образом для стока межени параметры условных кривых обеспеченности оказываются равными

$$\overline{M}(\Gamma) = \overline{M} + \frac{\sigma_{M}^2}{\sigma_{\Gamma}^2}(\Gamma - \overline{\Gamma}) = 0{,}4 - 0{,}1\,(\Gamma - \overline{\Gamma}),$$

$$\sigma_{M(\Gamma)} = \sigma_{\Pi(\Gamma)} = 0{,}095.$$

Отсюда

$$\overline{M}(0{,}7) = 0{,}4 - 0{,}1 \cdot 0{,}3 = 0{,}37,$$

$$\overline{M}(1{,}5) = 0{,}4 + 0{,}1 \cdot 0{,}5 = 0{,}45.$$

Обратим внимание на то, что условный стандарт $\sigma_{\Pi\Gamma} = \sigma_{M\Gamma} = 0{,}095$ во всех рассматриваемых случаях сохраняет свою величину неизменной. Так оно и должно быть, поскольку при заданном стоке года отклонение от нормы величины стока одной из фаз всегда численно равно и обратно по знаку отклонению стока другой фазы того же года.

Порядок построения двусторонне ограниченных кривых обеспеченности иллюстрируется числовым расчетом, проведенным для случая: $\Pi(1{,}5) = 1{,}05$; $\sigma_{\Pi\Gamma} = 0{,}095$.

Для выполнения расчета выражаем найденные параметры в долях стока года $\Gamma = 1{,}5$; этот сток по смыслу задачи является верхним пределом возможных колебаний стока половодья и, следовательно, должен быть принят за единицу

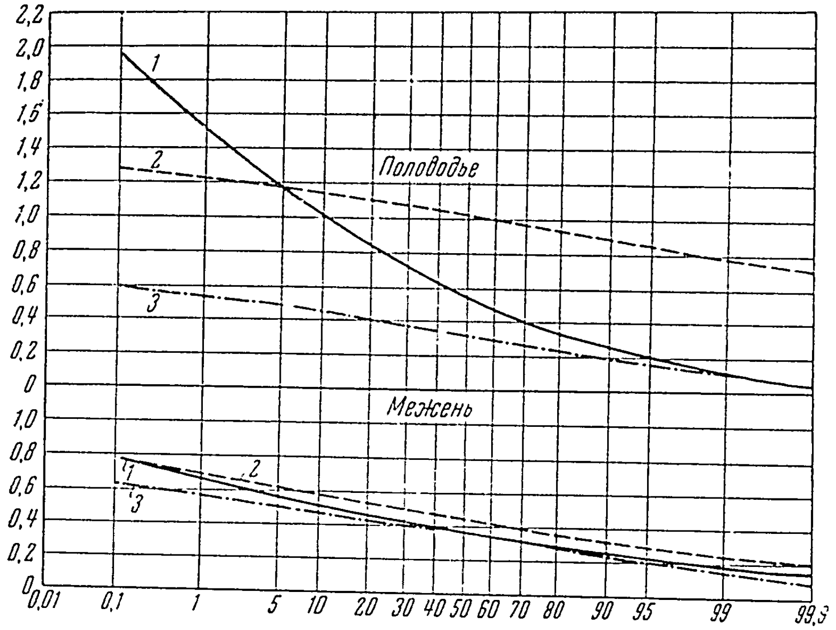
Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

при построении кривых обеспеченности рассмотренного выше типа. Получаем:

$$\bar{x}=\frac{1,05}{1,5}=0,7;\quad \sigma=\frac{0,095}{1,5}=0,0633.$$

По номограммам (фиг. 1 и 2 находим значения коэффициента изменчивости исходной биномиальной кривой, ха-



Фиг. 3. Безусловные и условные кривые обеспеченности стока половодья и межени:

1 — безусловные кривые; 2 — условные кривые при стоке года $X=1,5$, 3 — условные кривые при стоке года $X=0,7$

рактеризующей распределение вспомогательной функции v и переходного коэффициента, связывающего ее с рассматриваемой переменной x:

$$C_{v_r}=0,25;\quad A=0,16.$$

Последующий расчет приведен в табл. 1.

Подобным же образом были подсчитаны ординаты условных кривых обеспеченности для других расчетных случаев. Результаты расчетов сведены в табл. 2.

Соответствующие вычисленным параметрам условные кривые обеспеченности стока половодья и межени изображены на фиг. 3 в сопоставлении с исходными безусловными кривыми.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

	Обеспечен				
	0,1	1	5	10	25
	99,9	99	95	90	80
v	1,960	1,674	1,445	1,332	1,154
$-Av = \lg x$	−0,314	−0,268	−0,231	−0,213	−0,185
	$\bar{1}$,684	$\bar{1}$,722	$\bar{1}$,769	$\bar{1}$,787	$\bar{1}$,815
x	0,485	0,539	0,588	0,612	0,653
$П = 1,5x$	0,72	0,80	0,88	0,92	0,98

Таблица 2

Сток года		Обеспеченность p, %										
		0,1	1	5	10	20	50	75	90	95	99	99,9
0,7	М	0,62	0,58	0,52	0,50	0,45	0,37	0,30	0,24	0,21	0,15	0,10
	П	0,60	0,55	0,49	0,46	0,41	0,33	0,26	0,20	0,17	0,12	0,08
1,5	М	0,78	0,70	0,62	0,58	0,54	0,46	0,39	0,34	0,31	0,26	0,21
	П	1,29	1,24	1,19	1,16	1,12	1,04	0,98	0,92	0,88	0,80	0,72

Сравнение кривых обеспеченности стока половодья и межени с нанесенными на те же фигуры безусловными кривыми показывает, что условное среднее отклоняется от безусловного в том же направлении, в каком отклоняется от своего среднего аргумент; размах колебаний стока фаз при задании годового стока уменьшается. При этом для стока половодья сглаживание колебаний проявляется более отчетливо, чем для межени. Это и понятно, так как колебания стока половодья ($\sigma = 0{,}30$) составляют основную долю колебаний годового стока ($\sigma = 0{,}32$) и соответственно многоводность года определяется главным образом стоком его половодья, колебания же стока межени имеют сравнительно второстепенное значение.

Если мы сравним сток межени $М_p(Г)$, отвечающий по условным кривым обеспеченности некоторой вероятности превышения p, и сток половодья $П_{1-p}(Г)$, отвечающий по аналогичной условной кривой обеспеченности вероятности превышения $1 - p$, то в сумме мы должны получить сток года, принятый за условие. Иными словами, $М_p(Г) + П_{1-p}(Г) = Г$. Действительно, если при заданном стоке года Г в $1 - p$ случаях сток межени не достигает величины $М_p(Г)$, то,

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Таблица 1

ность p, %					
50	80	90	95	99	99,9
50	20	10	5	1	0,1
0,978	0,788	0,697	0,630	0,515	0,406
—0,157	—0,126	—0,112	—0,101	—0,820	—0,065
$\bar{1}$,843	$\bar{1}$,874	$\bar{1}$,888	$\bar{1}$,899	$\bar{1}$,918	$\bar{1}$,935
0,697	0,748	0,774	0,793	0,827	0,861
1,04	1,12	1,16	1,19	1,24	1,29

очевидно, во всех этих случаях сток половодья должен превышать разность $\Gamma - M_p(\Gamma)$. Сопоставление ординат условных кривых обеспеченности, соответствующих дополняющим друг друга до 100% вероятностям превышения, показывает, что при принятом ограниченном типе кривых распределения вероятностей поставленное условие соблюдается.

Приложение 1

Коэффициент корреляции суммы $y = x_1 + x_2$ со слагаемым x_1

Рассмотрим сумму случайных величин $y = x_1 + x_2$.

Пусть известны стандарты σ_{x_1}, σ_{x_2} и коэффициент корреляции $r_{x_1x_2}$. Требуется определить коэффициент корреляции r_{yx_1} между суммой и одним из слагаемых.

Задача решается посредством приводимых ниже элементарных преобразований:

$$r_{yx_1} = \frac{\Sigma (y - \bar{y})(x_1 - \bar{x}_1)}{n\sigma_y\sigma_x} = \frac{\Sigma (x_1 + x_2 - \bar{x}_1 - \bar{x}_2)(x_1 - \bar{x}_1)}{n\sigma_y\sigma_{x_1}} =$$

$$= \frac{\Sigma (x_1 - \bar{x}_1)^2 + \Sigma (x_2 - \bar{x}_2)(x_1 - \bar{x}_1)}{n\sigma_y\sigma_{x_1}} = \frac{n\sigma^2_{x_1}}{n\sigma_y\sigma_{x_1}} + \frac{\Sigma (x_2 - \bar{x}_2 (x_1 - x_1)}{n\sigma_y\sigma_{x_1}} =$$

$$= \frac{\sigma_{x_1} + r_{x_1x_2}\sigma_{x_2}}{\sigma_y}. \quad (1)$$

Выражая в знаменателе стандарт суммы через стандарты слагаемых, получаем окончательно

$$r_{yx_1} = \frac{\sigma_{x_1} + r_{x_1x_2}\sigma_{x_2}}{\sqrt{\sigma^2_{x_1} + \sigma^2_{x_2} + 2r_{x_1x_2}\sigma_{x_1}\sigma_{x_2}}} \quad (2)$$

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Рассмотрим некоторые частные случаи. Положим, что слагаемые x_1 и x_2 статистически независимы, т. е. $r_{x_1x_2}=0$. В этом случае

$$r_{yx_1}=\frac{\sigma_{x_1}}{\sqrt{\sigma_{x_1}^2+\sigma_{x_2}^2}}. \quad (3)$$

Допустим теперь, что стандарты $\sigma_{x_1}=\sigma_{x_2}$. Тогда

$$r_{yx_1}=\frac{1+r_{x_1x_2}}{\sqrt{2\,(1+r_{x_1x_2})}}=\sqrt{\frac{1+r_{x_1x_2}}{2}}. \quad (4)$$

Наконец, если $r_{x_1x_2}=0$, $\sigma_{x_1}=\sigma_{x_2}$, то

$$r_{yx_1}=\frac{1}{\sqrt{2}}=0{,}707. \quad (5)$$

При функциональной линейной связи между слагаемыми

$$r_{x_1x_2}=1,$$

$$r_{yx_1}=\frac{\sigma_{x_1}+\sigma_{x_2}}{\sqrt{(\sigma_{x_1}+\sigma_{x_2})^2}}=1.$$

Приложение 2

Параметры условной кривой обеспеченности слагаемого при заданной величине суммы

При решении некоторых гидрологических и водохозяйственных задач приходится исследовать колебания слагаемых, составляющих некоторую сумму, величина которой задана.

Для наглядности рассмотрим решение этой задачи применительно к колебаниям объема стока какой-либо фазы годового цикла (например, межени или половодья) при заданном стоке года, частью которого является эта фаза.

Положим, что

$$\text{Г}=\text{П}+\text{М},$$

где Г — сток года,

П — сток половодья,

М — сток межени.

Требуется построить условную кривую обеспеченности стока фазы (П или М) при заданном стоке года.

Пусть между стоком половодья и стоком следующей за ним межени существует корреляционная связь, теснота которой характеризуется коэффициентом корреляции $r_{\text{ПМ}}$. В таком

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

случае по уравнению (1) приложения 1 коэффициент корреляции $r_{ГП}$, выражающий тесноту связи между стоком года и стоком составляющего часть его половодья, определяется равенством

$$r_{ГП} = \frac{r_{ПМ}\sigma_М + \sigma_П}{\sigma_Г}. \qquad (1)$$

Подобным же образом коэффициент корреляции $r_{ГМ}$, связывающий сток года со стоком межени, можно записать:

$$r_{ГМ} = \frac{r_{ПМ}\sigma_П + \sigma_М}{\sigma_Г}. \qquad (2)$$

В только что написанных выражениях величин $\sigma_П$, $\sigma_М$, $\sigma_Г$ обозначаются стандартные отклонения стока половодья, межени и года.

Параметры условной кривой обеспеченности стока половодья при заданном стоке года Г выражаются равенствами:

условное среднее арифметическое

$$\overline{П}(Г) = \overline{П} + \frac{r_{ПМ}\sigma_М + \sigma_П}{\sigma_Г} \cdot \frac{\sigma_П}{\sigma_Г}(Г - \overline{Г}) =$$

$$= \overline{П} + \frac{\sigma_П}{\sigma_Г^2}(r_{ПМ}\sigma_М + \sigma_П)(Г - \overline{Г}); \qquad (3)$$

условное стандартное отклонение

$$\sigma_{П(Г)} = \sigma_П\sqrt{1 - r_{ПГ}^2} = \sigma_П\sqrt{1 - \left(\frac{r_{ПМ}\sigma_М + \sigma_П}{\sigma_Г}\right)^2} =$$

$$= \frac{\sigma_П}{\sigma_Г}\sqrt{\sigma_М^2 - r_{ПМ}^2\sigma_М^2} = \frac{\sigma_П\sigma_М}{\sigma_Г}\sqrt{1 - r_{ПМ}^2}. \qquad (4)$$

Подобный же вид имеют и выражения параметров условной кривой обеспеченности стока межени М(Г) при заданном стоке года Г. Они отличаются от написанных выше только тем, что индексы П и М меняются местами.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Н. Рыбкин. К вопросу о расчете максимальных расходов воды на основе математической статистики. Гидротехническое строительство, № 4, 1947.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

М. Ф. СРИБНЫЙ

ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДОСБОРОВ

§ 1. О СВЯЗИ ПАВОДКОВ С ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ВОДОСБОРОВ

Процессы формирования и движения паводков непосредственно связаны с геоморфологическими элементами водосборов, так как эти процессы зависят от той среды, в которой они происходят. Для разработки методов расчета паводков требуется не только качественное описание, но и количественное выражение геоморфологических элементов естественных водосборов. Необходимо конкретное изучение геоморфологических элементов и выражение их в виде аналитических связей.

Без аналитической связи геоморфологических элементов водосборов невозможны принципиальные решения гидравлических задач о движении паводков, а без количественного выражения аналитических связей невозможно применение полученных решений на практике.

К геоморфологическим элементам, требующим аналитического описания, а затем и количественного выражения, относятся: а) рельеф водосборов, б) русловая сеть, в) извилистость логов, г) продольные профили логов, д) живые сечения логов.

Принципиальное значение этой стороны проблемы паводков заключается также в следующем. Если к определенному водосбору отнести в опытном порядке различные аналитические схемы геоморфологических характеристик, то можно судить о возможной погрешности, которая допускается при принятии какой-либо схемы. Благодаря этому становится принципиально возможным контроль над влиянием природы строения водосборов на паводки. Это имеет большое значение, так как контроль над влиянием природных факторов обеспечивает правильность расчетов.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

§ 2. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ РЕЛЬЕФА ВОДОСБОРОВ

Поверхность земной суши расчленяется множеством водораздельных линий на водосборы или бассейны периодических и постоянных, малых и больших водотоков. Разработка проблемы паводков на этих водосборах вызывает необходимость классификации их рельефа.

Изучение инфильтрации как фактора водопотерь при формировании паводков объясняет небольшие расходы паводков на водосборах с песчаными почвами, однако не может объяснить небольшие расходы паводков на равнинных водосборах с малопроницаемыми или непроницаемыми почвами, но с развитым микрорельефом. Фактор инфильтрации не объясняет также и катастрофических паводков на горных водосборах, покрытых, казалось бы, весьма проницаемыми почвами. При определении водовпитывающей способности почв на горизонтальной огражденной площадке со стоячей водой, без учета влияния рельефа на режим инфильтрации и механизм образования потерь, выводы получаются далекими от действительных потерь при стоке.

Рельеф водосбора является одним из основных факторов формирования паводков. Он влияет на метеорологические условия, эрозионные процессы, гидравлический режим паводков, на количественное выражение скоростей стекания и образование потерь воды при стоке. Влияние рельефа на образование потерь имеет двоякий характер: с одной стороны, он влияет на режим инфильтрации, с другой — на потери от заполнения микрорельефа. Чем меньше крутизна рельефа, тем больше влияние микрорельефа на потери. Изучение влияния рельефа и микрорельефа на формирование паводков даст возможность обеспечить устойчивость сооружений против воздействия паводков, особенно в горных районах, и значительно удешевить строительство.

Характеристика рельефа важна для работ по преобразованию природы водосбора путем создания искусственного микрорельефа в виде террас на горных водосборах и горизонтальной распашки на равнинных водосборах. От тех или иных характеристик рельефа зависят мероприятия по защите от паводков городов, инженерных сооружений, промышленных зданий и сельскохозяйственных территорий.

Так, методы защиты от селевых паводков, например, г. Алма-Аты и г. Еревана должны значительно отличаться именно по условиям рельефа водосборов.

В некоторых случаях актуальна не только защита от паводков, но и их использование, особенно в засушливых районах. Строительство прудов и водоемов, осуществляемое в СССР

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

по государственному плану, является одним из видов использования паводков. Характер возможного использования паводков также зависит от условий рельефа местности.

Вопросы рельефа земной поверхности имеют важное значение и для ряда других областей знания.

Хотя в научной литературе не имеется количественной классификации рельефа, однако существует большой описательный материал по его характеристике.

Первую классификацию горного рельефа дал великий русский ученый М. В. Ломоносов. В своем сочинении «Первые основания металлургии или рудных дел» (1763) он пишет: «Разделение гор. Горы разделяются на пологие и крутые, также на большие и малые горки и бугры. Пологими горами называются те, которые вверх подымаются помалу, так что без утруждения люди и всякий скот на них восходить может. Такие горы лежат в Саксонии около Фрейбурга, как на версте и больше едва с башнями равняются. Напротив того, крутые горы вдруг кверху встают, так что людям и скоту на них с трудом, а иногда и совсем взойти не можно. За большие горы почесть можно, которые длиною и шириною на несколько верст простираются, за малые кои версты меньше. Буграми или холмами называются малые горки, на ровном месте порознь или на поверхности великой горы стоящие».

Количественная классификация рельефа возможна по его средней крутизне. Отдельные участки водосборов, будь то равнинных или горных, могут иметь самую различную крутизну скатов. Однако средняя крутизна рельефа водосбора в целом различна для различных типов рельефа и служит объективной его характеристикой.

Средняя крутизна рельефа водосбора может быть установлена по плану в горизонталях. Если обозначить отметки горизонталей через h_0, h_1, $h_2 \ldots h_n$, длины горизонталей через λ_0, λ_1, $\lambda_2 \ldots \lambda_n$, частные площади водосбора между горизонталями через F_1, F_2, $F_3 \ldots F_n$, то в развернутом виде формула средней крутизны рельефа может быть записана следующим образом:

$$j = \frac{1}{F}\left[\frac{(h_0 - h_1)(\lambda_0 + \lambda_1) F_1}{2F_1} + \frac{(h_1 - h_2)(\lambda_1 + \lambda_2) F_2}{2F_2} + \right.$$

$$\left. + \ldots \frac{(h_{n-1} - h_n)(\lambda_{n-1} + \lambda_n) F_n}{2F_n}\right]. \qquad (1)$$

После сокращения при $h_0 - h_1 = h_1 - h_2 = \ldots = h_{n-1} - h_n = \Delta$ формула средней крутизны принимает известное выражение:

$$j = \frac{\Delta \Sigma \lambda}{F}, \qquad (2)$$

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

где j — средняя крутизна рельефа;

$\Sigma\lambda$ — сумма длин всех горизонталей;

Δ — расстояние между горизонталями по высоте;

F — площадь водосбора.

В данном случае j выражается как тангенс угла крутизны рельефа $\alpha°$. От выражения $j = \mathrm{tg}\,\alpha$ легко перейти к $j = \sin\alpha$, что в ряде случаев является более правильным.

Для определения значений j были использованы планы в горизонталях многих водосборов, расположенных в различных геоморфологических районах страны. Карты имели масштаб 1 : 25 000, 1 : 42 000 и 1 : 50 000. В результате проведенных исследований получена классификация рельефа водосборов (табл. 1).

Классификация рельефа имеет трехстепенный характер: 1) примитивная характеристика рельефа делением его на равнины и горы; 2) обобщенная характеристика рельефа как равнинного, холмистого, гористого и высотного; 3) собственно классификация рельефа водосборов с подразделением каждой из обобщенных характеристик рельефа на три категории.

В результате получаются двенадцать классов рельефа водосборов (в скобках указаны предельные значения α в градусах): плоский (0—1/4), равнинный (1/4—1/2), волнистый (1/2—1); увалистый (1—2), холмистый (2—4), сильно холмистый (4—7); предгорный (7—12), гористый (12—18), горный (18—24); высокогорный (24—30), высотный (30—37), островершинный (37—45).

Интересно подчеркнуть, что средняя крутизна рельефа водосбора р. М. Алматинки (F=116 км²) оказалась равной точно 30°, т. е. относится к высокогорному рельефу (X класс), средняя крутизна рельефа водосбора р. Слюдянки (F=72 км²) оказалась равной 24°, т. е. относится к горному рельефу (IX класс), средняя крутизна рельефа водосборов оврага Джервеж (F=39 км²) и р. Гедар (F=58 км²), давших селевое наводнение в 1946 г. в г. Ереване, оказалась соответствующей предгорному (VII класс) и холмистому рельефу (V класс).

Таким образом, выясняется, что селевые паводки при определенных условиях возможны не только на горных, но и на холмистых водосборах. На водосборе р. М. Алматинки защита г. Алма-Аты от селевых паводков методами террасирования склонов оказалась несостоятельной из-за большой крутизны рельефа, для водосборов же в районе г. Еревана террасирование и облесение их будут действенной мерой защиты города от селевых паводков.

Значение j входит в формулу определения потерь при стоке и, следовательно, в методы расчета паводков.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Таблица 1

Примитивная характеристика рельефа	Обобщенная характеристика рельефа	Характеристика рельефа водосбора	Класс рельефа	Средняя крутизна рельефа		
				$j = \sin \alpha$	tg α	α°
Равнины (0—7°)	Равнинный (0—1°)	Плоский	I	0—0,005	0—0,005	0—1/4
		Равнинный	II	0,01	0,01	1/2
		Волнистый	III	0,02	0,02	1
	Холмистый (1—7°)	Увалистый	IV	0,04	0,04	2
		Холмистый	V	0,07	0,07	4
		Сильнохолмистый	VI	0,12	0,12	7
Горы (7—45°)	Гористый (7—24°)	Предгорный	VII	0,2	0,21	12
		Гористый	VIII	0,3	0,32	18
		Горный	IX	0,4	0,44	24
	Высотный (24—45°)	Высокогорный	X	0,5	0,58	30
		Высотный	XI	0,6	0,75	37
		Островершинный	XII	0,7	1,00	45

§ 3. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РУСЛОВОЙ СЕТИ

Русловая сеть водосборов состоит из элементарных верховых ручейков, борозд, рытвин, промоин, ложбин, лощин, оврагов, каньонов, логов, балок, долин.

Многообразие элементов русловой сети связано с многообразием природных условий — рельефа, почвенного и растительного покровов, а также с различными хозяйственными мероприятиями.

Естественный водосбор следует рассматривать как последовательно развитую русловую сеть от склоновых ручейков до главного лога. Склоновый ручеек на некотором расстоянии от водораздела сливается с другими ручейками, далее слияние ручейков нарастает и образует небольшой ложок, множество ложков в свою очередь путем последовательного слияния обра-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

зуют лога разной степени развитости, впадающие в главный лог. Такое естественное геоморфологическое представление о строении русловой сети водосборов имеет большие преимущества по сравнению с часто принимаемой схемой водосбора в виде одной или двух наклонных плоскостей. Основные черты этого строения поддаются аналитическому описанию без грубой схематизации водосбора.

Для каждого лога длиной L можно получить закономерность нарастания питающей площади водосбора путем замены ломаной линии графика питания эквивалентной плавной кривой, подчиняющейся аналитическим связям (фиг. 1). В этом случае частные площади питания F_x на расстоянии x от водораздела равны

$$F_x = F_1 \left(\frac{x}{L}\right)^{\nu+1}, \tag{3}$$

а переменная по длине x ширина y питающей площади равна

$$y = \frac{dF_x}{dx} = (\nu + 1)\frac{F_1}{L}\left(\frac{x}{L}\right)^{\nu}, \tag{4}$$

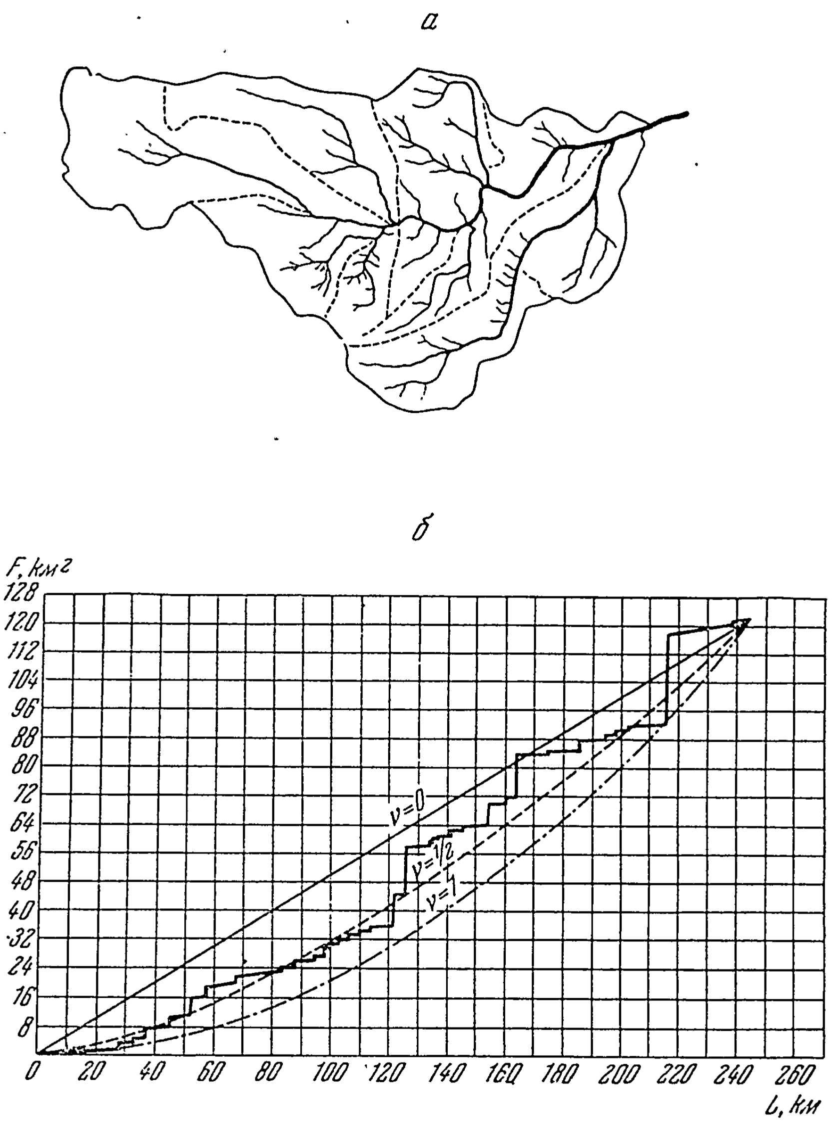
где F_1 — общая площадь питания главного лога, которая может отличаться от общей площади водосбора F в том случае, если в замыкающем створе впадают сосредоточенные притоки, не участвующие в распределении питания лога по его длине: ν — постоянный для каждого случая показатель питания; при $\nu = 0$ питание происходит по форме прямоугольника, при $0 < \nu < 1$ — по форме параболы, при $\nu = 1$ — по форме треугольника, при $\nu > 1$ — по форме обратной параболы и т. д. Разные значения ν позволяют учесть любое распределение русловой сети.

Таким образом, в процессах стока имеет значение не геометрическая внешняя форма водосбора, а его, так сказать, гидрографическая форма, учитывающая не только внешние, но и внутренние водоразделы данного водосбора. Фигура бокового питания имеет мало общего с фигурой площади водосбора по внешним контурам. При прямоугольном водосборе форма бокового питания может быть треугольной или любой иной.

Для выявления форм распределения русловой сети (форм бокового питания) были обработаны данные по большому количеству (более 1000) естественных водосборов различных районов Советского Союза. При этом было установлено, что в среднем боковое питание логов соответствует значению $\nu = 0{,}5$ (закон параболы), а в отдельных случаях ν может быть различным.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2



Фиг. 1.

а — русловая сеть водосбора; б — график нарастания водосборных площадей

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

К несколько иным результатам пришел в своей диссертационной работе Л. Д. Курдюмов, который принял в основу выводов не длину главного лога, а контурную длину водосбора и после обработки натурных материалов интерпретировал принятую нами связь (3) следующим образом:

$$F = \frac{F_1}{L^{\nu+1}} x^{\nu+1} = \frac{0,5}{\delta_к^{\ \nu+1}} x^{\nu+1} = \frac{0,5}{\delta_к^{\ 2}} x^2, \qquad (5)$$

где $\delta_к$ — коэффициент кривизны длины водосбора.

В этом случае боковое питание в среднем для равнинных водосборов оказалось соответствующим форме треугольника ($\nu = 1$), при этом относительная ширина бассейна в среднем без учета коэффициента кривизны равна

$$\frac{F_1}{L^{\nu+1}} = \frac{F_1}{L^2} = 0,5. \qquad (6)$$

Для холмистых водосборов $\nu < 1$, что указывает на связь разветвленности русловых систем с рельефом водосборов.

Средние характеристики водосборов по их длине применимы для некоторых случаев анализа стоковых процессов.

В общем случае необходима индивидуальная оценка особенностей водосборов не по длине водосбора, а по длине главного лога, так как движение паводка осуществляется по главному логу. Длина водосбора и длина лога в геоморфологическом отношении могут весьма резко различаться.

Существенным является тот факт, что в некоторых случаях разветвленность русловой сети водосборов осложняется местными особенностями естественного или искусственного микрорельефа. Понижения микрорельефа частично или полностью задерживают воду, создают мертвые пространства, участвующие в процессе поверхностного стока лишь в потерях воды при формировании паводков. Это неразрывно связано с классификацией рельефа.

Представление о естественном водосборе как о системе русел вплоть до мельчайших водораздельных ручейков не исключает в отдельных случаях рассмотрения стока на плоскости, что может иметь значение для аэродромных и некоторых городских площадей. Правда, и в этих случаях приходится ставить вопрос о «ветвистом» стоке и вводить поправки в расчетную схему. Задача о стоке на плоскости имеет главным образом методологическое значение.

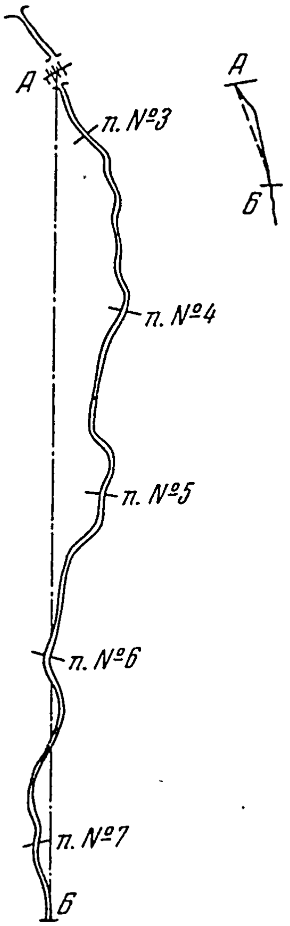
§ 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗВИЛИСТОСТИ ЛОГОВ

Извилистость русел характеризуется отношением $\delta = \frac{L_д}{L}$, где $L_д$ — действительная линия главного лога от водораздела до расчетного створа, L — та же длина, измеренная без

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

учета мелких извилин, но с учетом генерального направления главного лога (фиг. 2). Надо отличать коэффициент извилистости δ от коэффициента кривизны $\delta_к$, определяемого отношением $\delta_к = \frac{L_д}{L_в}$, где $L_в$ — контурная длина водосбора.



Фиг. 2. Извилистость логов на картах разного масштаба

Длина участка *А—Б* измерена по плану 1 : 10 000; $l = 1{,}72$ км.
Длина участка А—*Б* измерена по карте 1 : 100 000; $l = 1{,}59$ км; $\delta = \frac{1{,}72}{1{,}59} = 1{,}08$

Извилистость логов можно ставить в зависимость от рельефа водосборов и их площади (или длины). Извилистость русел в горных районах обычно меньше, чем в равнинных, тогда как кривизна русел в горных районах может быть и больше, чем в равнинных. В низовьях лог может быть более извилистым, т. е. может иметь больше меандр, чем в верховьях.

При определении характера извилистости в расчетных случаях следует в запас прочности учитывать вероятное направление струй в паводок, а не в межень. При отсутствии определений извилистости в натуре можно принять следующие ориентировочные значения извилистости в пределах от $\delta=1{,}05$ до $\delta=1{,}25$ и в среднем $\delta=1{,}15$, в зависимости от характера лога (табл. 2).

В природных условиях может встретиться значительно большая извилистость, чем $\delta=1{,}25$. В этом случае следует рекомендовать индивидуальное определение длины лога и его извилистости при прохождении паводка.

Таблица 2

Характеристика лога по его извилистости при высоком горизонте	δ
Слабоизвилистый	1,05
Извилистый	1,15
Сильноизвилистый	1,25 и больше

Поскольку во время паводка извилистость течения становится значительно меньше, чем в межень, то, казалось бы, фактор извилистости не следует переоценивать. Однако в про-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

цессе формирования паводка во времени извилистость существенным образом сказывается на длине путей стекания еще до достижения пика паводка. Кроме того, и во время достижения пика паводка извилистость меженнего русла все же сказывается на сопротивлении движению потока при высоком горизонте, даже при полном перекрытии водой всех извилин. Это и заставляет изучать извилистость русел как один из многих факторов проблемы паводков.

§ 5. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБОБЩЕНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ ЛОГОВ И РЕК

Если на рельеф данного водосбора наложить объем отрицательного рельефа так, чтобы воображаемая поверхность водосбора была горизонтальной, то в вертикальной плоскости продольного сечения вдоль лога можно различить две характерные площади P и D (фиг. 3). Одну из них, P, ограниченную линией дна лога и нижней горизонтальной прямой, назовем площадью полноты рельефа; другую, D, ограниченную той же линией дна и верхней горизонтальной прямой, назовем площадью дефицита рельефа.

При продольном профиле лога по прямой $D=P$, в подавляющем большинстве случаев $D>P$, в сравнительно редких случаях $D<P$. Во всех случаях, когда $D\gtrless P$, представляется возможным получить необходимые аналитические зависимости, описывающие натурные условия изменения рельефа вдоль лога от водораздела до устьевого сечения русла.

Если обозначить частные площади дефицита по x через D_x, то при обобщенно параболическом очертании продольного профиля получим для расстояния x от водораздела следующую зависимость:

$$D_x = D\left(\frac{x}{L}\right)^{\zeta+1}. \tag{7}$$

При прямоугольном очертании площади D $\zeta=0$, при параболическом — $0<\zeta<1$, треугольном — $\zeta=1$, обратно параболическом — $\zeta>1$.

Для каждого створа x соответствующая переменная по длине лога высота площади дефицита z равна

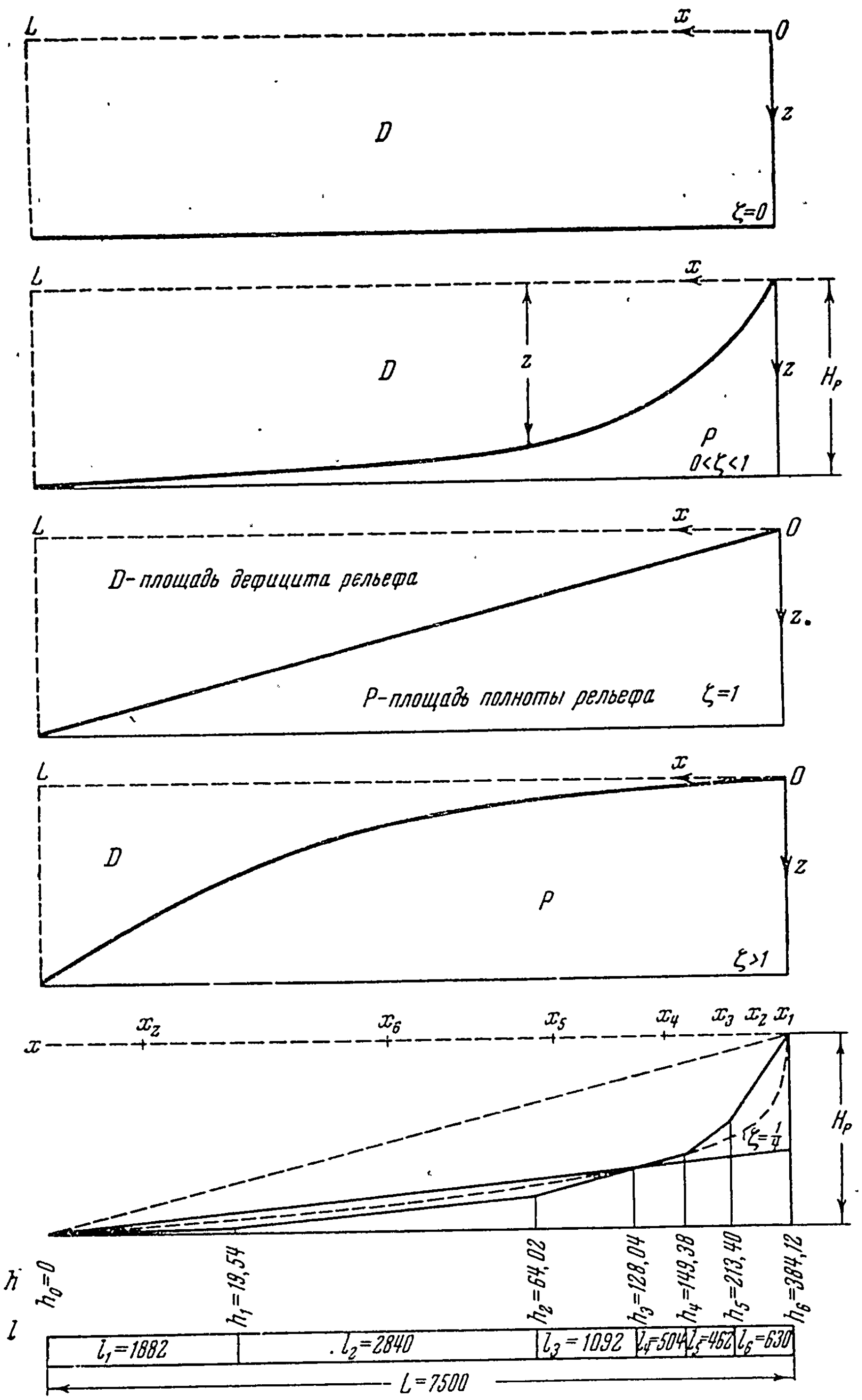
$$z=\frac{dD_x}{dx}=(\zeta+1)\frac{D}{L^{\zeta+1}}x^{\zeta}. \tag{8}$$

Тогда продольный уклон в сечении x (понимаемый как тангенс угла наклона) будет равен

$$I_x=\frac{dz}{dx}=\zeta(\zeta+1)\frac{D}{L^{\zeta+1}}x^{\zeta-1}. \tag{9}$$

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2



Фиг. 3. Принципиальные схемы продольных профилей логов и обработка реального продольного профиля

где
дна
замы
паде
П
П
когд
т. е.
В пр
$\zeta = 0$
В о
пере
В
явля
хо
с те
русла
ней
Это о
= со
перем
В
ний
гнут
где P
над
$l_1 l$
уклон

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Общая величина площади дефицита рельефа равна

$$D = \frac{LH_р}{1+\zeta} = \frac{L^2 I_в}{1+\zeta}, \qquad (10)$$

где $H_р$ — превышение водораздельной точки лога над точкой дна лога в замыкающем створе;

$I_в$ — воздушный уклон по длине лога от водораздела до замыкающего створа (измеряемый как тангенс угла общего падения рельефа)

$$I_в = \frac{H_р}{L}. \qquad (11)$$

Подставив значение D из (10) в (9), получим

$$\frac{dz}{dx} = I_в \zeta L^{1-\zeta} x^{\zeta-1}. \qquad (12)$$

При треугольном очертании площади дефицита рельефа, когда $\zeta = 1$, получим

$$\frac{dz}{dx} = I = \text{const}, \qquad (13)$$

т. е. уклон в этом случае будет постоянным по длине лога. В предельном случае при прямоугольном очертании D, когда $\zeta = 0$, продольный уклон лога будет равен нулю $\frac{dz}{dx} = 0$. В остальных случаях величина продольного уклона будет переменной по x.

В природных условиях шероховатость главного лога также является в общем случае переменной по x. При этом шероховатость обычно увеличивается к верховьям лога, но вместе с тем к верховьям обычно увеличивается и уклон дна русла. В связи с этим произведение mI^z в формуле средней скорости приобретает относительно устойчивое значение. Это отчасти оправдывает обычное принятие $I = \text{const}$ при $m = \text{const}$, хотя и не исключает возможных решений задачи при переменном уклоне дна.

В тех случаях, когда желательно учитывать лишь средний постоянный уклон, при любом ломаном очертании вогнутого продольного профиля, можно пользоваться формулой

$$I = \frac{(P_0 + P_1)\, l_1 + (P_1 + P_2)\, l_2 + \ldots P_{n-1} l_n}{L^2}, \qquad (14)$$

где $P_1 P_2 \ldots P_n$ — превышение переломов продольного профиля над устьевой точкой;

$l_1 l_2 \ldots l_n$ — длины участков главного лога с равномерным уклоном.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Формула получается при условии, если площадь полноты рельефа P по логу при действительном ломаном очертании продольного профиля равна той же площади при очертании продольного профиля по прямой (фиг. 3).

$$P = \left[\frac{(P_0 + P_1)\,l_1}{2} + \frac{(P_1 + P_2)\,l_2}{2} + \right.$$

$$\left. + \ldots \frac{(P_{n-1} + 0)\,l_n}{2}\right] = \frac{IL^2}{2} = H_{\text{ср.}}\,L, \qquad (15)$$

где $H_{\text{ср}}$ — средняя отметка средневзвешенного профиля,

L — горизонтальная проекция длины лога.

Получаемая из этого равенства формула (14) выражает средневзвешенный уклон дна лога. Осреднение уклона в соответствии с этой формулой можно производить графическим путем без применения самой формулы, поскольку она дает равновеликие площади по профилю выше и ниже линии осредненного уклона.

Для выпуклого профиля средневзвешенный уклон имеет следующее выражение:

$$I = \frac{P_1 l_1 + (P_1 + P_2)\,l_2 + \cdots (P_{n-1} + P_n)\,l_n}{L^2}, \qquad (16)$$

где P_1, $P_2 \ldots P_{n-1}$, P_n — понижение переломов продольного профиля по сравнению с водораздельной точкой в конце участков длиной l_1, $l_2 \ldots l_n$ с равномерным уклоном.

Эта формула получается в том случае, если площадь дефицита рельефа D при действительном ломаном очертании продольного профиля равна той же площади при очертании продольного профиля по прямой.

Для вогнутого профиля прямая средневзвешенного уклона проходит через точку, соответствующую отметке устьевого створа, а для выпуклого профиля через точку, соответствующую водораздельной отметке. Что касается выпукло-вогнутого профиля, то прямая средневзвешенного уклона может быть и выше и ниже устьевой и водораздельной отметок.

В общем случае наклон линии средневзвешенного профиля может быть определен графически, исходя из условия равенства и минимума положительных и отрицательных площадей естественного профиля, отсекаемых линией средневзвешенного уклона.

Попутно отметим, что благодаря сказанному устраняются противоречия в назначении среднего уклона главного лога. Большею частью этот уклон определяли как $I = \frac{H}{L}$, но такое определение давало одинаковый уклон всех продольных про-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

филей, будь то вогнутый или выпуклый, т. е. уклон назначался только в зависимости от превышения водораздельной точки, без учета характера продольного профиля.

В некоторых официальных нормах рекомендовалось принимать уклон в пределах ярко выраженного русла или характерной части лога по выбору производящего изыскания, но во всех случаях составляющей не менее половины длины бассейна. Однако такие указания не учитывали уклона верхней половины длины лога.

Имеется еще много предложений по назначению среднего уклона; поскольку они неудовлетворительны, останавливаться на них не будем.

§ 6. АНАЛИЗ СВЯЗИ ЭЛЕМЕНТОВ ЖИВЫХ СЕЧЕНИЙ ЛОГОВ

Разнообразные по форме живые сечения логов также могут быть описаны известными аналитическими зависимостями. Если обозначить ширину потока поверху через b, соответствующую этой ширине глубину на стрежне через H, ширину потока при глубине $H_1 = 1$ через b_1, то можно получить следующую степенную зависимость

$$b = b_1 \left(\frac{H}{H_1}\right)^{\mu} = b_1 H^{\mu}, \tag{17}$$

где μ — показатель кривой очертания дна и формы живого сечения: при прямоугольном русле $\mu = 0$, при параболическом $0 < \mu < 1$, при треугольном $\mu = 1$, при обратно параболическом $\mu > 1$. Такой зависимости можно подчинить природные формы живых сечений при их статистическом осреднении. Указанные зависимости относятся в одинаковой мере к симметричным и несимметричным формам живых сечений (фиг. 4).

Приращение площади живого сечения $d\omega$ равно

$$d\omega = bdH = b_1 H^{\mu} dH. \tag{18}$$

Интегрируя от 0 до H, получим

$$\omega = \int_0^H b_1 H^{\mu} dH = \frac{b_1}{\mu + 1} H^{\mu+1}. \tag{19}$$

Из (17) и (19) получим значения средней глубины

$$H_c = \frac{\omega}{b} = \frac{H}{\mu + 1} \tag{20}$$

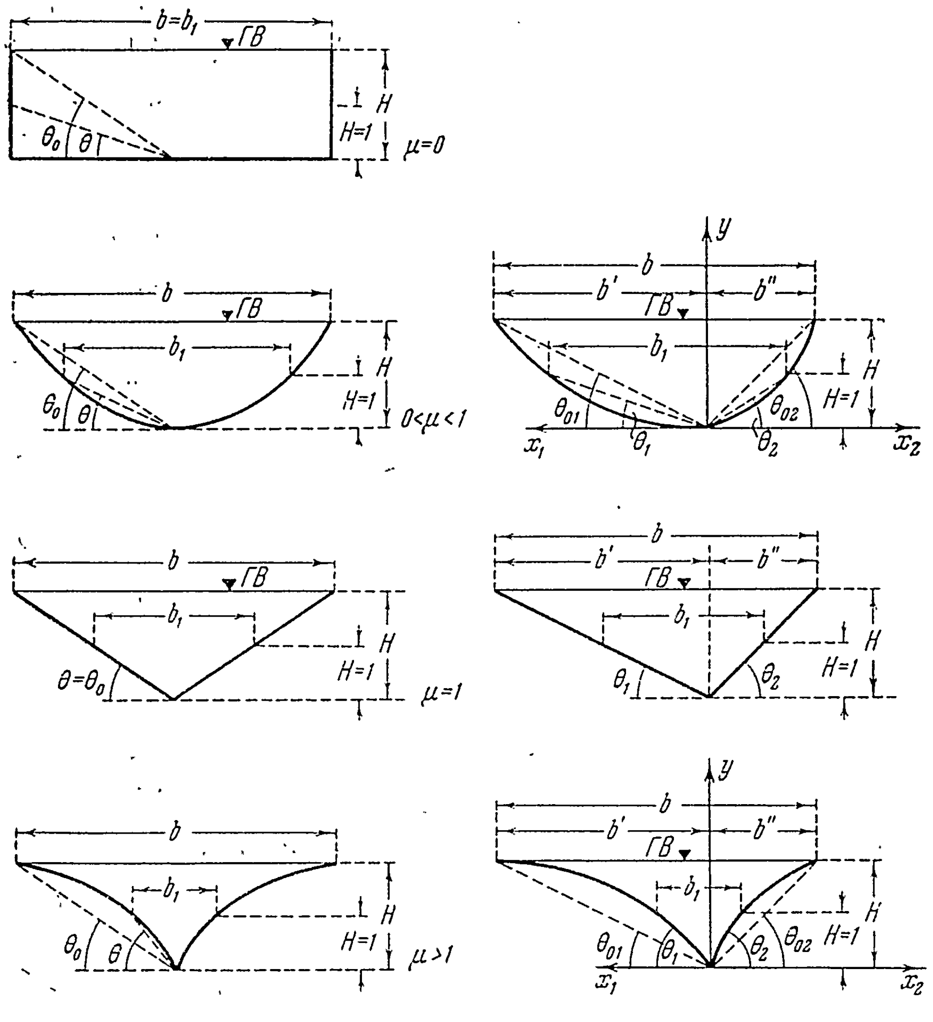
Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

и значение гидравлического радиуса

$$R = R_1 H_c = \frac{R_1 H}{\mu + 1}, \tag{21}$$

где R_1 — гидравлический радиус при средней глубине $H_c = 1$.



Фиг. 4. Схемы поперечных профилей логов

Известно, что естественные русла в большинстве случаев могут рассматриваться как «широкие» русла и тогда $R = H_c$ и $R_1 = 1$. Для общности выводов можно оставить R_1 в структуре формул на случай частных отклонений от широких русел.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Подставив значение H из уравнения (21) в (19), получим

$$\omega = b_1 \frac{(\mu+1)^\mu}{R_1{}^{\mu+1}} R^{\mu+1}. \tag{22}$$

Значение b_1 можно выразить так:

$$b_1 = \frac{2H_1}{\operatorname{tg}\theta}. \tag{23}$$

Из (19) получим

$$\omega = \frac{2H_1}{(\mu+1)\operatorname{tg}\theta} H^{\mu+1}.$$

Вводя обозначение $\frac{2H_1}{(\mu+1)\operatorname{tg}\theta} = \frac{1}{\gamma}$, получим

$$\omega = \frac{H^{\mu+1}}{\gamma}, \tag{24}$$

где $\theta = \frac{\theta_1+\theta_2}{2}$ — среднее арифметическое углов между горизонтальной линией и наклонной, идущей к урезам воды (при $H_1 = 1$) от наинизшей точки очертания дна. Очертания живых сечений в общем случае несимметричны и потому выводы относятся к общему случаю.

С учетом (23) формула (22) принимает вид

$$\omega = \frac{2(\mu+1)^\mu}{R_1{}^{\mu+1}\operatorname{tg}\theta} R^{\mu+1}. \tag{25}$$

В выражении для площади ω можно отметить следующее. Если обозначить

$$\alpha_1 = \frac{1}{(\mu+1)^\mu}, \tag{26}$$

$$\alpha_2 = \frac{R_1{}^{\mu+1}\operatorname{tg}\theta}{2}, \tag{27}$$

то заметим, что α_1 и α_2 выражают характерные особенности сечения: α_1 учитывает лишь форму поперечного профиля русла, α_2 — относительную крутизну боковых граней русла. Одна и та же форма русла возможна при различной крутизне граней и, наоборот, русло может быть круто углубленным или пологим при различной его форме.

Для краткости начертания формул обозначим $\alpha_1\alpha_2$ общим символом $\alpha = \alpha_1\alpha_2$, учитывающим в целом очертание поперечного профиля русла:

$$\alpha = \alpha_1\alpha_2 = \frac{1}{(\mu+1)^\mu} \frac{R_1{}^{\mu+1}\operatorname{tg}\theta}{2}. \tag{28}$$

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

В частном случае при треугольном профиле живых сечений ($\mu=1$), ($\alpha_1=0{,}5$)

$$\alpha = \frac{1}{2}\,\frac{\operatorname{tg}\theta}{2(\operatorname{tg}^2\theta+1)}\,. \qquad (29)$$

При прямоугольном профиле $\alpha_1=1$, $\alpha_2=\frac{1}{b}$, где b — ширина русла; тогда $\alpha=\frac{1}{b}$.

Аналогичным путем определяется α для любого очертания русла, в том числе и для «русла» при стекании по плоскости, что в некоторых случаях представляет интерес. В последнем случае $\alpha_1=1$ (при $\mu=0$), $\alpha_2=\frac{1}{B}$, где B — ширина плоского прямоугольного водосбора; тогда

$$\alpha = \frac{1}{B}\,. \qquad (30)$$

Таким образом, дальнейшие выводы являются общими для различных форм русел (включая и плоский водосбор, где русло отсутствует).

С учетом (19), (26) и (27) уравнение (25) принимает следующий вид:

$$\omega = \frac{H_1}{H_1^{\mu}}\,\frac{R^{\mu+1}}{\alpha} = \frac{H_1^{1-\mu}R^{\mu+1}}{\alpha} = \frac{R^{\mu+1}}{\alpha}\,. \qquad (31)$$

Множитель $H_1^{1-\mu}=1$ здесь и в дальнейшем следует иметь в виду для соблюдения размерности, за исключением треугольного русла, когда размерность соблюдается и без учета этого множителя (поскольку $\mu=1$) при безразмерном α.

ВЫВОДЫ

1. При исследовании паводков необходимы не только описательные, но и аналитические, количественные характеристики геоморфологических элементов водосборов. Аналитические и количественные характеристики дают основу для конкретного разрешения проблемы паводков, тогда как описательные характеристики имеют только познавательное значение.

2. На основе изучения природных данных и материалов описательного характера в статье даны количественные характеристики и аналитические связи геоморфологических элементов: рельефа водосборов, русловой сети, извилистости логов, продольных профилей русел и живых сечений.

3. Классификация рельефа дает основу для правильного решения вопроса о потерях воды при формировании паводков,

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

а также вопроса о необходимых гидротехнических, агротехнических и лесотехнических мероприятиях для воздействия на природные процессы паводков с целью уменьшения или полной ликвидации их вредного действия, а также с целью их использования.

4. Аналитические связи характеристик рельефа русловой сети, извилистости логов, продольных профилей русел и их живых сечений являются достаточными для постановки и разрешения проблемы движения паводков, как гидравлической задачи, что в конечном счете приводит к получению аналитической связи природных факторов, участвующих в формировании паводков.

5. Геоморфологические исследования водосборов необходимо развивать, так как они являются важным разделом учения о паводках, равноправным с разделами гидравлическим, климатическим, почвенно-ботаническим, эрозионным и хозяйственно-техническим.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

С. Н. КРИЦКИЙ, М. Ф. МЕНКЕЛЬ

О РАСПЛАСТЫВАНИИ ВОЛНЫ ВЫСОКИХ ВОД ПРИ ПРОДВИЖЕНИИ ПО ПРИЗМАТИЧЕСКОМУ РУСЛУ

§ 1. ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Продвижение по речным руслам половодных и паводочных волн всегда сопровождается явлениями их трансформации, создающими тенденцию к уменьшению максимального расхода воды по длине реки. В общем случае эта тенденция в большей или меньшей степени затушевывается поступлением в русло воды из питающих реку притоков. В наиболее отчетливой форме и в чистом виде явления трансформации волн высоких вод можно проследить на бесприточных участках рек. Примером участков, почти не имеющих приточности, может служить Волга на протяжении от устья Камы до Каспия.

Вопрос об учете изменений величины максимального расхода воды половодья или паводка в процессе продвижения их по реке возникает при решении многих гидрологических и гидравлических задач. С оценкой этого явления связана, в частности, возможность использовать гидрометрические наблюдения для суждения о гидрологическом режиме на участках реки, более или менее удаленных от створа измерений.

Нередко естественная трансформация волн высоких вод становится фактором, существенно влияющим на конструкцию гидротехнических сооружений и на капиталовложения в них. Именно так, например, обстоит дело в проектах гидроэлектростанций на Нижней Волге, где волны весенних половодий заметно трансформируются при продвижении по руслу реки. Трансформация волны, происходящая на свободных от подпора участках русла, должна учитываться при оценке условий регулирования высокого стока водохранилищами, приводя к дополнительному уменьшению пропускаемых через сооружения максимальных расходов воды и давая благодаря сокраще-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

нию водосливного фронта вполне реальную и ощутительную экономию.

Трансформация половодных и паводочных волн вызывается причинами двух категорий — гидравлическими и гидрогеологическими. Основными факторами, определяющими характер рассматриваемого явления, служат гидравлические факторы. Однако в ряде случаев — при широких пойменных разливах и при большой водопроницаемости слагающих пойму грунтов — процессы водообмена между руслом и грунтами поймы, сводящиеся к поглощению воды на подъеме и гребне половодья и к отдаче воды в русло на спаде волны, могут также оказать существенное влияние на ход явления. В качественном отношении это влияние прослеживается иногда вполне отчетливо; что касается количественных характеристик, то получение их затрудняется из-за отсутствия материалов специально поставленных гидрогеологических и гидрологических исследований.

В этой статье мы будем рассматривать только гидравлическую сторону процесса.

Как известно, движение волны по руслу сопровождается двумя явлениями — распластыванием и перекашиванием. Распластывание вызывается тем, что лобовая часть волны продвигается с большей скоростью, чем тыльная, поскольку уклон водной поверхности на лобовой части больше. Вследствие этого тыльная часть волны как бы отстает от лобовой, длина волны, т. е. протяжение занятого ею участка реки, увеличивается, а максимальный уровень и расход воды понижаются. Перекашивание волны вызывается относительно быстрым продвижением верхней, примыкающей к гребню части ее; причиной перекашивания является большая глубина и соответственно большая скорость течения близ вершины волны. В результате перекашивания ветвь подъема на гидрографе становится более крутой, чем ветвь спада, а максимальный уровень и расход воды в некоторой степени уменьшаются.

Полное исследование этих явлений связано с анализом неустановившегося движения воды. Такая задача, как известно, решается современной гидравликой. Однако даже при целом ряде упрощений исследование движения волны высоких вод методами гидравлики неустановившегося течения не приводит к законченным аналитическим решениям, которые позволили бы выразить в виде алгебраических формул влияние каждого из факторов, воздействующих на уменьшение максимального расхода воды. Между тем, в таком выводе, хотя бы грубо приближенном, но правильно отражающем основные соотношения, ощущается острая потребность. Без него сущность исследуемого явления остается недостаточно ясной. Попытка подоб-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

ного, грубо схематизированного, но доведенного до конца аналитического решения приводится ниже.

Предлагаемое решение имеет целью показать, что распластывание половодий и паводков может быть объяснено указанными выше гидравлическими факторами, главным из которых является различие уклонов водной поверхности на лобовом и тыльном участках волны. Подобный анализ тем более желателен, что в последние годы в специальной литературе появились исследования, в которых процесс распластывания объясняется, с нашей точки зрения, неправильно. Так, в работах Института гидрологии и гидротехники Академии наук УССР это явление связывается с неодинаковостью скоростей течения в различных точках поперечного сечения потока. Такое объяснение не может быть признано правильным хотя бы потому, что неравномерность распределения скоростей по сечению наблюдается и в закрытых трубопроводах, в которых распластывание гидрографов заведомо исключается.

При оценке возможности применения выводимых в настоящей работе зависимостей как расчетных следует иметь в виду, что продвижение волн высоких вод по естественным руслам происходит в значительно более сложных условиях, чем те, которые учитываются принимаемой при исследовании схемой. Поэтому количественные результаты упрощенного расчета характеризуют лишь порядок величин, выражающих интенсивность распластывания, а не точные их значения.

§ 2. ВЫВОД ОСНОВНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

Попытаемся в первом приближении оценить явление распластывания, возникающее в процессе продвижения волны высоких вод по призматическому руслу. Иными словами, подвергнем изучению собственно трансформацию волны в процессе ее движения, а не регулирующий эффект искусственных или естественных водохранилищ, образуемых стеснениями русла.

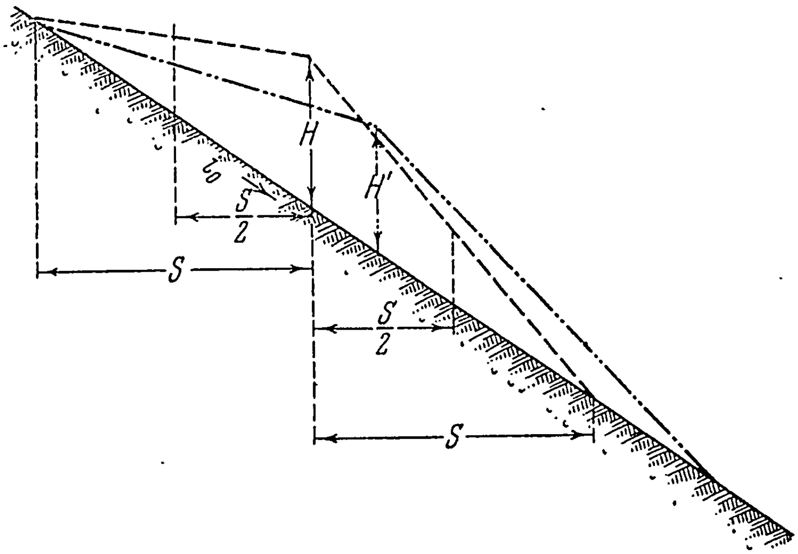
При исследовании мы будем исходить из схемы, изображенной на фиг. 1. Волну высоких вод схематически представим в продольном профиле в виде треугольника. Динамические условия движения будем исследовать, ограничиваясь средними сечениями лобовой и тыльной частей волны, как бы рассматривая отставание тыла волны от ее лба. Пренебрежем инерционными силами ввиду их малости и допустим, что свободная поверхность на каждом элементарном участке полностью определяется гидравлическими сопротивлениями на этом участке. Иными словами, сведем динамическое уравнение к формуле квадратического сопротивления, которую примем в виде:

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

$$v = \frac{1}{n} h_{\text{ср.}}^{0,67} I^{0,5} . \qquad (1)$$

Здесь v — скорость течения, средняя по живому сечению;
n — коэффициент шероховатости;
$h_{\text{ср}}$ — средняя глубина сечения;
I — уклон водной поверхности.



Фиг. 1. Гидравлическая схема

Соблюдение уравнения неразрывности условимся проверять лишь в применении ко всей волне в целом, объем W которой должен оставаться неизменным при перемещении половодья вдоль по реке. Поперечное сечение F зададим уравнением

$$F = Ah^{m+1} . \qquad (2)$$

Коэффициент A обозначает площадь сечения при глубине наполнения $h = 1$. При $m = 0$ сечение имеет форму прямоугольника с вертикальными стенками шириною A, при $m = 1$ — форму треугольника, обращенного вершиной вниз.

В дальнейших исследованиях мы подробнее рассмотрим именно эти два случая. В условиях прямоугольного сечения наиболее отчетливо проявляется взаимодействие основных факторов, влияющих на распластывание волн высоких вод. При треугольном сечении ширина водного зеркала уве-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

личивается с повышением уровня воды, что до некоторой степени сближает условия с наблюдающимися в естественных руслах. Однако вывод основных зависимостей мы проведем применительно к общему случаю.

При принятых исходных положениях основные соотношения между элементами потока определяются следующими зависимостями:

ширина зеркала

$$B = \frac{dF}{dh} = A(m+1)\,h^m\,; \tag{3}$$

средняя глубина (гидравлический радиус)

$$h_{\text{ср}} = \frac{h}{m+1}\,; \tag{4}$$

скорость течения

$$v = \frac{1}{n} h_{\text{ср}}^{0,67} I^{0,5} = \frac{1}{n}\left(\frac{h}{m+1}\right)^{0,67} \cdot I^{0,5}\,; \tag{5}$$

расход воды

$$Q = vF = \frac{Ah^{m+1,67} \cdot I^{0,5}}{n\,(m+1)^{0,67}}\,; \tag{6}$$

объем волны

$$W = 2\int_0^s F dx = \frac{2AH^{m+1}s}{m+2}\,, \tag{7}$$

где s — длина половины волны (см. фиг. 1).

Для средних сечений лобовой и тыльной частей волны $h = \frac{H}{2}$.

Назовем средний уклон водотока i_0. В таком случае

$$I_{\text{лоб}} = i_0 + \frac{H}{s}$$

и скорость продвижения среднего сечения лобовой части волны

$$v_{\text{лоб}} = \frac{0,63H^{0,67}}{n\,(m+1)^{0,67}}\left(i_0 + \frac{H}{s}\right)^{0,5}. \tag{8}$$

Скорость продвижения среднего сечения тыльной части волны при $I_{\text{тыл}} = i_0 - \frac{H}{s}$ равна

$$v_{\text{тыл}} = \frac{0,63H^{0,67}}{n\,(m+1)^{0,67}}\left(i_0 - \frac{H}{s}\right)^{0,5}. \tag{9}$$

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Скорость распластывания волны определяется как разность скоростей лба и тыла

$$\frac{ds}{dt} = v_{\text{лоб}} - v_{\text{тыл}} =$$

$$= \frac{0{,}63H^{0{,}67}}{n\,(m+1)^{0{,}67}}\left(\sqrt{i_0 + \frac{H}{s}} - \sqrt{i_0 - \frac{H}{s}}\right). \qquad (10)$$

При заданном объеме волны W длина ее $2s$ связана с высотой гребня H соотношением

$$s = \frac{W\,(m+2)}{2AH^{m+1}}. \qquad (11)$$

Отсюда

$$ds = -\frac{W\,(m+2)\,(m+1)}{2AH^{m+2}}\cdot dH. \qquad (12)$$

Объединяя уравнения (10) и (12), находим производную высоты гребня по времени

$$\frac{dH}{dt} = -\frac{1{,}26AH^{m+2{,}67}}{nW\,(m+2)\,(m+1)^{1{,}67}}\left(\sqrt{i_0 + \frac{H}{s}}\right) - \sqrt{i_0 - \frac{H}{s}}. \qquad (13)$$

Решая совместно уравнения (8) и (9), находим скорость продвижения гребня волны

$$v_{\text{греб}} = \frac{v_{\text{лоб}} + v_{\text{тыл}}}{2} = \frac{0{,}32H^{0{,}67}}{n\,(m+1)^{0{,}67}}\left(\sqrt{i_0 + \frac{H}{s}} + \sqrt{i_0 - \frac{H}{s}}\right). \qquad (14)$$

Уравнения (13) и (14) позволяют определить интенсивность понижения высоты гребня волны по длине потока

$$\frac{dH}{dx} = \frac{dH}{dt}\cdot\frac{dt}{dx} = \frac{dH}{dt}\cdot\frac{1}{v_{\text{греб}}} =$$

$$= -\frac{4AH^{m+2}}{W\,(m+2)\,(m+1)}\cdot\frac{\sqrt{i_0 + \frac{H}{s}} - \sqrt{i_0 - \frac{H}{s}}}{\sqrt{i_0 + \frac{H}{s}} + \sqrt{i_0 - \frac{H}{s}}}. \qquad (15)$$

От уравнения (15) нетрудно перейти к зависимости, характеризующей интенсивность уменьшения по длине потока величины максимального расхода воды. Для этого необходимо рассмотреть зависимость между глубиной H воды на гребне волны и максимальным расходом воды.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

В общем виде эта зависимость записывается в форме равенства

$$Q_{\text{макс}} = \frac{AH^{m+1,67}\, i^{0,5}_{\text{греб}}}{n\,(m+1)^{0,67}}. \qquad (16)$$

Здесь $i_{\text{греб}}$ — уклон водной поверхности на гребне волны. Соответственно,

$$dQ_{\text{макс}} = \frac{A \cdot i^{0,5}_{\text{греб}}(m+1,67)\, H^{m+0,67}}{n\,(m+1)^{0,67}}\, dH. \qquad (17)$$

Совместное решение уравнений (15) и (17) приводит к искомому выражению

$$\frac{dQ_{\text{макс}}}{dx} = -\frac{4A^2 H^{2m+2,67}\, i^{0,5}_{\text{греб}}\,(m+1,67)}{Wn\,(m+2)\,(m+1)^{1,67}} \times$$

$$\times \frac{\sqrt{i_0+\frac{H}{s}} - \sqrt{i_0-\frac{H}{s}}}{\sqrt{i_0+\frac{H}{s}} + \sqrt{i_0-\frac{H}{s}}}. \qquad (18)$$

Для дальнейших преобразований необходимо установить значение уклона $i_{\text{греб}}$. Примем соотношение

$$i^{0,5}_{\text{греб}} = \frac{\sqrt{i_0+\frac{H}{s}} + \sqrt{i_0-\frac{H}{s}}}{2}. \qquad (19)$$

При этом скорость течения на гребне волны совпадает с вычисленной выше скоростью продвижения гребня. Соответствующая условию (19) величина уклона оказывается равной

$$i_{\text{греб}} = \frac{1}{4}\left(i_0+\frac{H}{s}+i_0-\frac{H}{s}+2\sqrt{i_0^2-\left(\frac{H}{s}\right)^2}\right) =$$

$$= 0,5 i_0\left(1+\sqrt{1-\left(\frac{H}{si_0}\right)^2}\right). \qquad (20)$$

Соотношения между элементами волн половодий и паводков на реках таковы, что высота подъема воды H во всех практически возможных случаях значительно меньше, чем падение реки на половине s длины волны.

Пренебрегая дробью $\left(\frac{H}{si_0}\right)^2$ по сравнению с единицей, получаем, что $i_{\text{греб}} \approx i_0$. Таким образом, принятое допущение практически равносильно приравниванию уклона на гребне волны уклону реки.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Условившись относительно значения $i_{\text{греб}}$, мы можем преобразовать уравнение (18), приведя его к виду

$$\frac{dQ_{\text{макс}}}{dx} = -\frac{2A^2H^{2m+2,67}(m+1,67)}{Wn(m+2)(m+1)^{1,67}} \times$$
$$\times\left(\sqrt{i_0+\frac{H}{s}}-\sqrt{i_0-\frac{H}{s}}\right). \qquad (21)$$

Рассмотрим выражение $\sqrt{i_0+\frac{H}{s}}-\sqrt{i_0-\frac{H}{s}}$.

Возводя в квадрат, получим

$$\left(\sqrt{i_0+\frac{H}{s}}-\sqrt{i_0-\frac{H}{s}}\right)^2 = 2i_0\left[1-\sqrt{1-\left(\frac{H}{si_0}\right)^2}\right].$$

Отсюда

$$\sqrt{i_0+\frac{H}{s}}-\sqrt{i_0-\frac{H}{s}} =$$
$$= \sqrt{i_0}\sqrt{2\left[1-\sqrt{1-\left(\frac{H}{si_0}\right)^2}\right]} = \sqrt{i_0}k, \qquad (22)$$

где коэффициент

$$k = \sqrt{2\left[1-\sqrt{1-\left(\frac{H}{si_0}\right)^2}\right]}.$$

Составим таблицу значений k.

$\frac{H}{si_0}$	k	$\frac{H}{si_0}$	k
0	0	0,6	0,633
0,1	0,100	0,7	0,756
0,2	0,200	0,8	0,894
0,3	0,303	0,9	1,183
0,4	0,410	1,0	1,414
0,5	0,518		

Таблица показывает, что при $\frac{H}{si_0} < 0,5$, т. е. при $H < 0,5si_0$ величины k практически совпадают с $\frac{H}{si_0}$. Учитывая отмечен-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Условившись относительно значения $i_{\text{греб}}$, мы можем преобразовать уравнение (18), приведя его к виду

$$\frac{dQ_{\text{макс}}}{dx} = -\frac{2A^2H^{2m+2,67}(m+1,67)}{Wn(m+2)(m+1)^{1,67}}\times$$

$$\times\left(\sqrt{i_0+\frac{H}{s}}-\sqrt{i_0-\frac{H}{s}}\right). \qquad (21)$$

Рассмотрим выражение $\sqrt{i_0+\frac{H}{s}}-\sqrt{i_0-\frac{H}{s}}$.

Возводя в квадрат, получим

$$\left(\sqrt{i_0+\frac{H}{s}}-\sqrt{i_0-\frac{H}{s}}\right)^2 = 2i_0\left[1-\sqrt{1-\left(\frac{H}{si_0}\right)^2}\right].$$

Отсюда

$$\sqrt{i_0+\frac{H}{s}}-\sqrt{i_0-\frac{H}{s}} =$$

$$=\sqrt{i_0}\sqrt{2\left[1-\sqrt{1-\left(\frac{H}{si_0}\right)^2}\right]}=\sqrt{i_0}k, \qquad (22)$$

где коэффициент

$$k=\sqrt{2\left[1-\sqrt{1-\left(\frac{H}{si_0}\right)^2}\right]}.$$

Составим таблицу значений k.

$\frac{H}{si_0}$	k	$\frac{H}{si_0}$	k
0	0	0,6	0,633
0,1	0,100	0,7	0,756
0,2	0,200	0,8	0,894
0,3	0,303	0,9	1,183
0,4	0,410	1,0	1,414
0,5	0,518		

Таблица показывает, что при $\frac{H}{si_0}<0,5$, т. е. при $H<0,5si_0$ величины k практически совпадают с $\frac{H}{si_0}$. Учитывая отмечен-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

ное выше обстоятельство, что на реках $H < si_0$ и принимая во внимание равенство (11), можем приближенно написать

$$k = \frac{H}{si_0} = \frac{2AH^{m+2}}{W(m+2)\,i_0}. \qquad (23)$$

При подстановке найденного значения k в равенство (22) и в уравнение (21) последнее приводится к виду

$$\frac{dQ_{\text{макс}}}{dx} = -\frac{4A^3H^{3m+4,67}(m+1,67)}{W^2n\,(m+2)^2\,(m+1)^{1,67}}\cdot\frac{1}{i_0^{0,5}}. \qquad (24)$$

Высота гребня волны H может быть посредством равенства (16) выражена через максимальный расход воды

$$H = \left(\frac{Q_{\text{макс}}\,n\,(m+1)^{0,67}}{A\cdot i_0^{0,5}}\right)^{\frac{1}{m+1,67}}. \qquad (25)$$

Отсюда

$$H^{3m+4,67} = \left(\frac{Q_{\text{макс}}\,n\,(m+1)^{0,67}}{A\cdot i_0^{0,5}}\right)^{\frac{3m+4,67}{m+1,67}}. \qquad (26)$$

Обозначим показатель степени

$$\frac{3m+4,67}{m+1,67} = \mu. \qquad (27)$$

Подставляя равенство (25) в уравнение (23), получаем

$$\frac{dQ_{\text{макс}}}{dx} = -\frac{4A^{3-\mu}Q^{\mu}_{\text{макс}}\,n^{\mu-1}\,(m+1)^{0,67\mu-1,67}\,(m+1,67)}{W^2 i_0^{0,5(\mu+1)}\,(m+2)^2}. \qquad (28)$$

Подстановка в (28) числовых величин, соответствующих $m=0$ и $m=1$, приводит к следующим результатам:

а) для прямоугольного русла

$$\frac{dQ_{\text{макс}}}{dx} = -\frac{1,68A^{0,20}Q^{2,80}_{\text{макс}}\,n^{1,80}}{W^2 i_0^{1,90}}; \qquad (29)$$

б) для треугольного русла

$$\frac{dQ_{\text{макс}}}{dx} = -\frac{1,28A^{0,13}Q^{2,87}_{\text{макс}}\,n^{1,87}}{W^2 i_0^{1,93}}. \qquad (30)$$

Обращает внимание незначительность влияния, оказываемого на интенсивность распластывания волны поперечными размерами русла, характеристикой которых служит параметр A.

Из уравнения (29) следует, что, например, при прямоугольном русле увеличению ширины A русла вдвое соответ-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

ствует увеличение интенсивности распластывания всего лишь на 15%. Для треугольного русла соответствующая величина еще меньше.

Такие соотношения вытекают из структуры уравнения (24). В это уравнение параметр A явно входит в третьей степени. Одновременно параметр A не явно участвует в образовании множителя $H^{3m+4,67}$, причем показатель степени при A в выражении этого множителя близок к 3. В результате сокращения дроби в итоговые выражения параметр A входит в степени, близкой к нулю.

Уравнения (29) и (30) могут быть представлены также в несколько ином виде.

Представим показатель степени правой части равенства (26) в форме

$$\frac{3m+4,67}{m+1,67} = 3 - \frac{0,33}{m+1,67}. \quad (31)$$

Соответственно,

$$H^{3m+4,67} = \frac{Q^3_{\text{макс}}\, n^3 (m+1)^2}{A^3 \cdot i_0^{1,5}} \cdot H^{-0,33}. \quad (32)$$

Смысл такого преобразования заключается в том, что выделенная в качестве отдельного множителя величина $H^{-0,33} = \frac{1}{\sqrt[3]{H}}$ из-за свойств кубического корня сравнительно мало изменяется в пределах того диапазона H, который характерен для половодий и паводков равнинных рек.

Как известно, уровни половодий на равнинных реках обычно поднимаются над меженью на 5—10 *м*. Примем для дальнейших исследований величину $\frac{1}{\sqrt[3]{H}} = 0,6$. Ввиду отмеченной выше устойчивости значений кубического корня отклонения от принимаемой величины не могут быть особо велики.

Подставляя выражение (32) в уравнение (24) и используя только что введенное допущение, получим

$$\frac{dQ_{\text{макс}}}{dx} = -\frac{2,4 Q^3_{\text{макс}}\, n^2 (m+1)^{0,33} (m+1,67)}{i_0^{2}\, W^2 (m+2)^2}. \quad (33)$$

Подсчет показывает, что для прямоугольного и треугольного русел произведение $2,4\frac{(m+1)^{0,33}(m+1,67)}{(m+2)^2}$ близко к еди-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

нице. Такой результат позволяет записать рассматриваемую зависимость в виде

$$\frac{dQ_{\text{макс}}}{dx} = -\frac{Q_{\text{макс}}^3 n^2}{W^2 i_0}. \qquad (34)$$

Проверим размерность полученного выражения. Левая часть его измеряется в *м*$^2 \cdot$ *сек*$^{-1}$.

Размерность правой части совпадает с левой, что подтверждается следующим расчетом:

$$(м^3 \cdot сек^{-1})^3 \cdot (м^{-0,33} \cdot сек)^2 \cdot (м^3)^{-2} \cdot (м^{-0,33}) =$$

$$= м^9 \cdot сек^{-3} \cdot м^{-0,67} \cdot сек^2 \cdot м^{-6} \cdot м^{-0,33} = м^2 \cdot сек^{-1}.$$

Последний из сомножителей, величина *м*$^{-0,33}$, выражает размерность множителя $H^{-0,33}$, принятого нами при упрощении формулы численно равным 0,6 *м*$^{-0,33}$.

Зависимость между величиной Q максимального расхода воды и расстоянием x от начального сечения, для которого $x = 0$, $Q = Q_0$, может быть получена путем интегрирования уравнения (34). Это уравнение можно представить в виде

$$-\frac{dQ}{Q^3} = \frac{n^2}{W^2 i_0^2} dx. \qquad (35)$$

Переходя к интегралам, получим

$$-\int \frac{dQ}{Q^3} = \int \frac{n^2}{W^2 i_0^2} dx + C. \qquad (36)$$

Отсюда

$$\frac{1}{2Q^2} = \frac{n^2}{W^2 i_0^2} x + C. \qquad (37)$$

Произвольная постоянная C определяется из начального условия

$$C = \frac{1}{2Q_0^2}. \qquad (38)$$

Подставляя это выражение в уравнение (37), приводим его к виду

$$\frac{1}{Q^2} = \frac{1}{Q_0^2} + \frac{2n^2}{W^2 i_0^2} x. \qquad (39)$$

Путем простейших преобразований получаем

$$Q^2 = \frac{Q_0^2}{1 + \frac{2Q_0^2 n^2}{W^2 i_0^2} x}. \qquad (40)$$

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Окончательно

$$Q = Q_0 \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{2Q_0^2 n^2}{W^2 i_0^2} x}}. \qquad (41)$$

Выражение (41) и представляет собой искомую зависимость между максимальным расходом воды и расстоянием от начального сечения до рассматриваемого.

Рассматривая выражения (34) и (41), мы приходим к выводу, что основными факторами, влияющими на интенсивность уменьшения по длине реки максимального расхода воды, являются острота гидрографа, характеризуемая отношением $\frac{Q_{\text{макс}}}{W}$, шероховатость русла и уклон реки. Максимальный расход воды уменьшается по мере продвижения волны по реке тем более интенсивно, чем острее гидрограф, т. е. чем больше отношение $\frac{Q_{\text{макс}}}{W}$, чем больше коэффициент шероховатости русла n и чем меньше уклон реки i_0.

§ 3. НЕКОТОРЫЕ СОПОСТАВЛЕНИЯ

Результаты приближенного расчета по формуле (41) были сопоставлены с выводами подробного гидравлического расчета. Для этой цели был рассмотрен участок русла с сечением треугольной формы ($m=1$), с заложением откосов, составляющим в сумме по двум берегам 10 : 1. Согласно выражению (2), для такого сечения коэффициент $A=5$, т. е. площадь сечения связана с глубиной наполнения уравнением $F=5h^2$. Продольный уклон русла принят равным $i_0=0{,}0001$. Коэффициент шероховатости $n=0{,}025$. По руслу указанных размеров пропускается волна, гидрограф которой во входном сечении рассматриваемого участка изображается в виде равнобедренного треугольника с максимальной ординатой 1200 *м³/сек*, при основании, равном 10 суткам = 864 000 *сек*. До начала этой волны и после ее прохождения по руслу пропускается постоянный расход воды, равный 16 *м³/сек*.

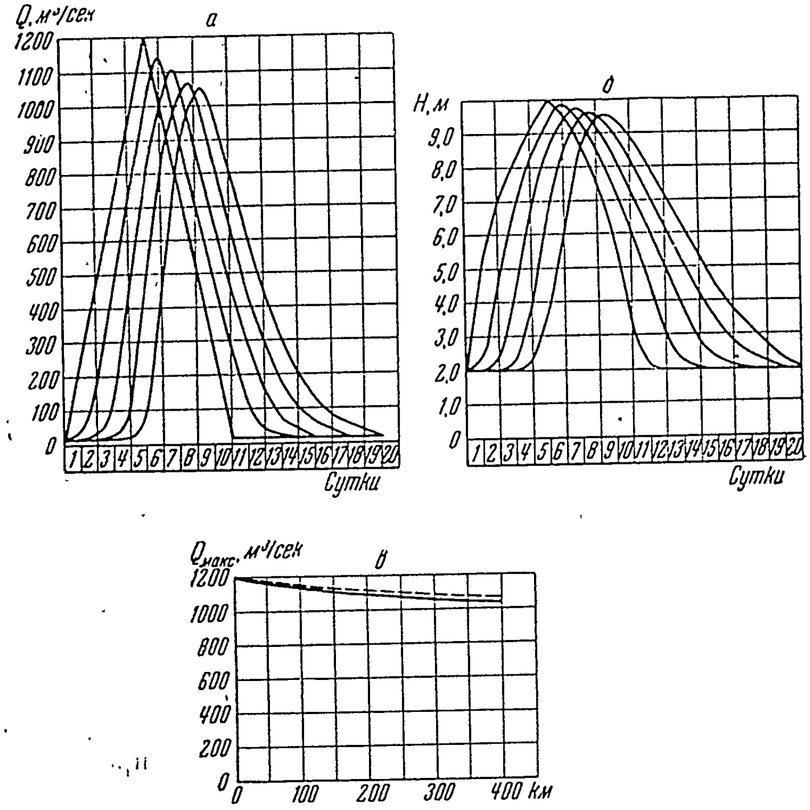
Гидравлический расчет продвижения волны проведен по методу мгновенных режимов с применением кривых возможных решений; длина расчетного участка принята равной 20 *км*. На фиг. 2 изображены основные результаты расчета. На графике *а* показаны гидрографы во входном сечении и в сечениях, отстоящих от него на 100, 200, 300 и 400 *км*. График *б* изображает колебания уровней воды в тех же сечениях. Сопоставление гидрографов, относящихся к различным сечениям, показывает,

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

что максимальный расход воды уменьшается по мере продвижения волны по руслу за счет распластывания и перекашивания. При этом очертания гидрографа постепенно принимают плавную, несколько асимметричную форму, свойственную половодьям крупных рек.

На графике *в* величины максимального расхода воды, вычисленные путем подробного расчета, сопоставлены с резуль-



Фиг. 2. Трансформация волны в призматическом русле:
——— по подробному расчету; — — — по приближенной формуле

татами, полученными по формуле (38). Если учесть приближенный характер этой формулы, то совпадение должно быть признано удовлетворительным.

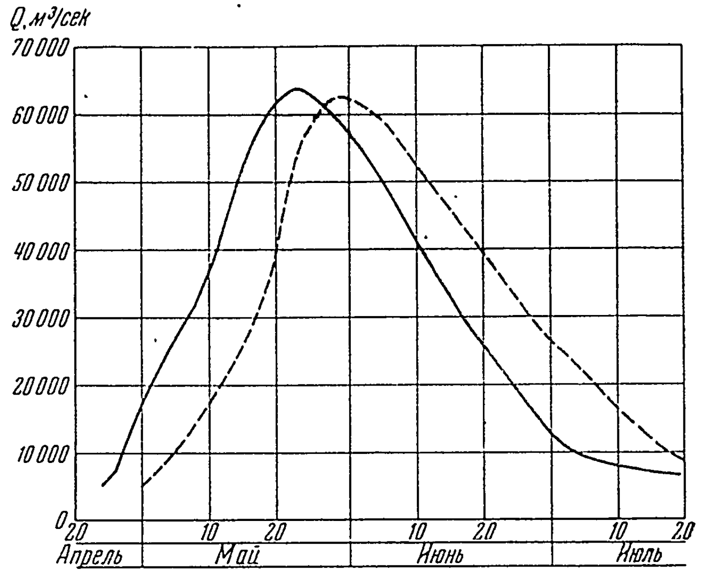
Следует отметить, что результаты подробного расчета сами по себе могут служить подтверждением того, что причиной трансформации волны являются различия в уклоне водной поверхности и в глубине в разных областях волны, а не распределение скорости по поперечному сечению. Гидравлические расчеты проводятся, как известно, общепринятыми методами с осредне-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

нием скорости по сечению. Тем не менее явления распластывания и перекашивания прослеживаются вполне отчетливо.

Непосредственное сопоставление выводов теоретического расчета с натурой затрудняется, как уже отмечалось, тем, что эффект распластывания половодных и паводочных волн определяется в реальных условиях не только факторами гидравлического, но также и гидрогеологического порядка. Исследования, связанные с изучением режима пойменных грунтовых вод в период половодья, значительно сложнее обычных гидрометрических работ. Таких исследований до настоящего времени почти нет, и все материалы, относящиеся к рассматриваемому вопросу, основаны на косвенных данных, не полноценных и не позволяющих получить достаточно полное и объективное суждение о явлениях водообмена между руслом реки и грунтами поймы и о влиянии этих процессов на трансформацию половодных волн. По этой причине составить представление о количественной стороне полученных выводов и оценить допущенные в процессе построений упрощения легче всего путем сравнения этих выводов с результатами подробных расчетов трансформации половодных волн, выполненных для некоторых конкретных условий методами гидравлики неустановившегося режима. Такие материалы имеются, хотя и в небольшом количестве. Наилучшими из них в отношении полноты исходных



Фиг. 3. Гидрографы Волжского половодья 1926 г.:

——— гидрограф половодья 1926 г. у Куйбышева; — — — — гидрограф половодья 1926 г. у Камышина, полученный расчетом

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

гидрологических данных и детальности гидравлического анализа являются расчеты продвижения половодной волны 1926 г. по Волге на участке от Куйбышева до Камышина. На фиг. 3 представлены заимствованные из материалов Гидропроекта гидрограф половодья в Куйбышевском створе, построенный по данным гидрометрических наблюдений, и гидрограф половодья в створе Камышина, полученный путем расчета. Сопоставление гидрографов дает представление об эффекте трансформации половодной волны вследствие гидравлических факторов. Из сопоставления следует, что в результате гидравлического распластывания максимальный расход воды, равный 64 000 $м^3/сек$ в створе Куйбышева, уменьшается при подходе к Камышину до 62500 $м^3/сек$. Подставляя параметры волжского русла в формулу (41), получим

$$Q_{\text{Кам}} = Q_{\text{Куйб}} \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{2Q_{\text{Куйб}}^2 \cdot n^2}{W^2 i_0^2} x}} =$$

$$= 64 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{1}{1 + 2\left(\frac{64 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^{-2}}{228.3 \cdot 10^9 \cdot 43 \cdot 10^{-6}}\right)^2 \cdot 660 \cdot 10^3}} =$$

$$= 62\,400 \ м^3/сек.$$

Здесь $n = 0{,}03$;
$i_0 = 0{,}000043$;
$W = 228{,}3$ $км^3$;
$x = 660$ $км$.

Следовательно, на протяжении участка в 660 $км$ максимальный расход уменьшается, согласно формуле, на 1600 $м^3/сек$. Эта величина близка к разности между приведенными выше цифрами, полученными путем детального расчета.

При оценке степени совпадения результатов расчета с действительностью следует не упускать из виду, что уравнение (41), по существу положенных в основу его допущений, не может претендовать на высокую точность. Как мы уже указывали в начале работы, основная цель, которая преследовалась при выводе уравнения, заключалась в выяснении состава и характера влияния главнейших факторов, определяющих интенсивность распластывания волны. Количественная оценка явления имеет заведомо приближенный характер из-за неточности целого ряда принятых нами допущений (форма поперечного сечения русла, призматичность его, треугольное очертание гидрографа и т. д.).

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Я. Д. ГИЛЬДЕНБЛАТ

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ, СВЯЗАННЫЕ С РАСЧЕТАМИ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ ДВИЖЕНИЯ И ОЦЕНКОЙ РАСПОЛАГАЕМЫХ ПО НАПОРУ ПИКОВЫХ МОЩНОСТЕЙ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

При проектировании крупных речных гидроэлектрических станций, ведущих суточное регулирование мощности, приходится подвергать подробному исследованию гидравлический режим потока в нижнем бьефе. Неравномерное поступление воды в бьеф вызывает колебания уровней ее, амплитуда которых достигает зачастую нескольких метров. Подробные исследования этого явления необходимы для решения многих задач: для оценки условий судоходства и для установления ограничений, которые должны быть наложены на режим суточного регулирования для обеспечения интересов судоходства, для выяснения условий работы гидромеханического оборудования и для определения мощности, с которой гидроэлектростанция может участвовать в покрытии максимума нагрузки по условиям работы турбин (располагаемая по напору пиковая мощность) и т. д.

В гидротехнической практике разработаны приемы расчетов режима суточного регулирования, основанные на методах гидравлики неустановившегося движения воды. Для успешного выполнения подобных расчетов требуется не только общая теория, устанавливающая принципиальные положения расчета, но и методика решения практических задач, определяющая правильную их постановку и целесообразный подход к решению. Такая методика в особенности необходима в рассматриваемой области, поскольку выполнение гидравлических расчетов суточного регулирования связано со сложными и трудоемкими вычислениями. В процессе исследования режима суточного регулирования некоторых гидроэлектростанций в отделе водного хозяйства Гидропроекта Министерства электростанций

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

оказалось возможным разработать методические положения, устанавливающие целесообразные приемы расчета и существенно упрощающие вычисления. Изложение этих приемов может представить интерес для инженеров, которым приходится выполнять расчеты неустановившегося движения воды в нижних бьефах гидроэлектростанций.

Настоящую работу можно разделить на две части. В первой содержатся указания, относящиеся к применению метода мгновенных режимов, наиболее употребительного в современной гидротехнической практике. Эти указания касаются: 1) формы граничных условий; 2) протяжения нижнего бьефа, включаемого в расчет, и разбивки его на расчетные участки; 3) расчетного интервала времени; 4) учета зимних условий.

Вторая часть работы представляет собой изложение приема, позволяющего обобщать результаты подробных расчетов, выполненных для ограниченного числа случаев, и на основе такого обобщения иметь более полное суждение о важнейших элементах суточного режима работы гидроэлектростанций.

Для речных гидроустановок уровень воды в верхнем бьефе изменяется в течение года и по годам в соответствии с режимом регулирования стока; переменными являются также форма графика нагрузки гидростанции и ледовые условия. Многообразие всех этих факторов, влияющих на величину пиковой располагаемой по напору мощности, затрудняет оценку режима пиковых мощностей в многолетнем разрезе. Обычно в проектах даже крупных гидроэлектростанций подробные трудоемкие расчеты по методу мгновенных режимов выполняются лишь для небольшого числа характерных суточных графиков нагрузки. В связи с этим определенный интерес и значение приобретает излагаемый в работе метод приближенной оценки режима пиковых мощностей гидроэлектростанций[1], позволяющий приближенно оценивать эти мощности за весь многолетний период, применительно к которому исследуется режим гидроэлектростанции.

1. ФОРМА ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

В расчетах неустановившегося движения в нижнем бьефе гидростанции при суточном регулировании ее мощности одним из граничных условий является график поступления воды в нижний бьеф (гидрограф), соответствующий суточному графику мощности и напоров. График мощностей гидростанции определяется в зависимости от величины ее среднемесячной мощности

[1] Метод приближенной оценки режима пиковых мощностей гидроэлектростанций разработан в Гидропроекте МЭС под руководством и при непосредственном участии Я. Д. Гильденблата и Д. В. Корепистова.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

и условий участия в покрытии графика нагрузки энергосистемы, в состав которой входит рассматриваемая гидростанция (учитываются недельная неравномерность, резервы — аварийный и частотный); этот график является заданным для расчетов неустановившегося движения.

Непосредственный пересчет графика нагрузки гидростанции в график расходов воды, поступающих в нижний бьеф, возможен при условии, если заранее известен суточный ход напоров гидростанции. Для этого должен быть задан суточный ход уровней воды в нижнем бьефе гидростанции. Такое задание невозможно, так как суточный ход уровней воды в нижнем бьефе, которым определяются напоры, может быть определен в результате расчетов неустановившегося движения: уровни воды в верхнем бьефе, также необходимые для исчисления напоров, принимаются в соответствии с режимом работы водохранилища по данным водохозяйственных расчетов.

В связи с изложенным заранее перестроить график мощностей в график расходов воды можно лишь условно, задавшись ходом уровней воды в нижнем бьефе или напорами; полученный таким путем гидрограф будет иметь неточности, соответствующие погрешностям в оценке напоров за каждый интервал времени. В тех случаях, когда ожидаемая амплитуда колебания напоров сравнительно мала, что можно установить по кривой расходов воды в нижнем бьефе, расходы воды на каждый интервал времени определяют по напору, отвечающему среднесуточной мощности гидростанции, исходя из уравнения $Q = \frac{N}{A \cdot H}$; коэффициент мощности $A = 9{,}81\, \eta_т \cdot \eta_г$ определяется в соответствии с характеристиками гидромеханического оборудования. Если же с изменением расходов воды уровни в нижнем бьефе гидростанции колеблются в значительных пределах, достигающих нескольких метров, то заранее перестраивать график нагрузки в график расходов воды не следует. Обычно в таких случаях расходы воды, поступающие в каждый данный момент времени в нижний бьеф, определяют в процессе гидравлического расчета, пользуясь упомянутым выше уравнением. Для того чтобы избежать лишнего подбора, расход воды в конце расчетного интервала времени исчисляется по мощности N, соответствующей рассматриваемому моменту, и по напору в начале интервала времени, т. е. предшествующего момента; такая незначительная погрешность в оценке напора за каждый момент времени, как показала практика расчетов, не вносит заметных отклонений в результаты расчета. При указанном порядке определения расходов воды следует по окончании гидравлических расчетов и увязке замкнутого суточного хода уровней и расходов воды в нижнем бьефе вычислить на каждый

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

момент времени напоры и по Q и H — мощности гидроэлектростанции и построить по этим данным график мощности, сопоставив его с первоначально заданным; обычно оба эти графика практически совпадают, что указывает на допустимость такого порядка построений.

Второе граничное условие в расчетах неустановившегося движения определяет положение фронта прямой волны в каждый данный момент времени или, как говорят, длину распространения возмущения за время от начала нарушения начального режима в реке (от начала расчета); это условие обычно принимается по уравнению

$$S = \sum \left(U_0 + \sqrt{g \frac{F}{B}} \right) \cdot \Delta t,$$

где S — расстояние от ГЭС до створа, в котором в данный момент находится фронт прямой волны;
U_0 — средняя скорость течения при начальном режиме;
g — ускорение силы тяжести;
F — площадь живого сечения;
B — ширина поверху;
Δt — расчетный интервал времени.

Такое граничное условие применяется для интервалов времени, непосредственно следующих за моментом перехода от начального условно установившегося режима к режиму суточного регулирования. На протяжении этих промежутков времени фронт волны не успевает отойти далеко от гидроэлектростанции.

Сохранение той же формы граничного условия для последующих интервалов времени привело бы к значительному осложнению расчетов, так как с каждым последующим интервалом времени пришлось бы соответственно удлинять исследуемое протяжение нижнего бьефа и, следовательно, увеличивать число расчетных участков. Осложнения расчета были бы связаны с необходимостью отыскивать для каждого интервала времени решение для так называемого «пионерного» участка путем деления его на подучастки. Однако применительно к расчетам неустановившегося движения в нижнем бьефе гидростанции при суточном регулировании ее мощности такое осложнение расчета не вызывается необходимостью и не может быть оправдано по приводимым ниже соображениям.

По мере удаления от створа ГЭС (от источника возмущения) суточная амплитуда колебания уровней и расходов воды постепенно уменьшается; уровни и расходы воды приближаются к средним их величинам, отвечающим условию работы гидростанции без регулирования со среднесуточной мощностью.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Волновые колебания, как говорят, затухают и на некотором расстоянии от ГЭС они практически неощутимы. Кривая затухания амплитуды колебания уровней и расходов воды по длине нижнего бьефа имеет вид вогнутой параболы; наибольшие колебания имеют место непосредственно в створе нижнего бьефа гидростанции.

Такой характер волновых колебаний позволяет практически ограничить длину исследуемого участка нижнего бьефа гидростанции; это соответствует также и задачам исследований режима потока в нижнем бьефе, связанным в основном с оценкой условий судоходства и определением пиковых располагаемых по напору мощностей гидростанции. Поэтому в качестве второго граничного условия принимают постоянство уровня или расхода воды в конце исследуемого протяжения нижнего бьефа или зависимость между уровнями и расходами воды в этом же створе, соответствующую условиям установившегося движения. Наиболее приемлемым в условиях речных бьефов является последний вид второго граничного условия, т. е. так называемая бытовая кривая расходов.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ НИЖНЕГО БЬЕФА, ВКЛЮЧАЕМОЙ В РАСЧЕТ, И РАЗБИВКА ЕЕ НА РАСЧЕТНЫЕ УЧАСТКИ

Общая длина исследуемого участка нижнего бьефа устанавливается по соображению с уклоном и размерами отводящего русла и его гидравлическими характеристиками; при этом учитывается то обстоятельство, что неточности в оценке режима уровней и расходов воды, вызванные принятием в качестве второго граничного условия бытовой кривой расходов в замыкающем створе, практически сглаживаются уже в начале предпоследнего расчетного участка.

При назначении длины исследуемого участка нижнего бьефа принимаются во внимание также особые обстоятельства: наличие в нижнем бьефе крупного притока, создающего благоприятные условия для отражения волн и резкого уменьшения их размеров ниже притока, наличие искусственных сооружений, водоемов и пр.

Практика расчетов показывает, что достаточно надежные результаты получаются при 7—10 расчетных участках (в отдельных случаях можно ограничиться пятью расчетными участками), сумма длин которых и составляет общее протяжение нижнего бьефа, включаемое в расчет. Разбивка исследуемого протяжения нижнего бьефа на расчетные участки производится по соображению с общим характером кривой затухания амплитуды колебания уровней воды, т. е. с учетом того, что волновые колебания постепенно уменьшаются по мере продвижения вниз

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

от створа гидростанции, а также исходя из состава имеющихся гидрологических и топографических материалов по отводящему руслу. Первый участок, сопрягаемый непосредственно с гидростанцией, берется по возможности коротким. По мере продвижения вниз по реке длина расчетных участков увеличивается.

Длина участка не должна быть больше пути продвижения фронта волны за расчетный интервал времени, т. е.

$$L \leqslant \left(U_0 + \sqrt{g\frac{F}{B}}\right) \cdot \Delta t.$$

Выполнение этого требования является обязательным лишь для начальных интервалов времени, пока фронт волны не достигнет конечного створа; последующее изменение характеристик режима потока на всем исследуемом протяжении нижнего бьефа происходит непрерывно по всему бьефу за весь интервал времени; поэтому та или иная разбивка бьефа на расчетные участки может повлиять лишь на характер осреднения элементов, при допущении линейного изменения уровней и расходов воды по времени и в пределах расчетного участка. При стремлении к большей точности определения уровней и расходов воды длина расчетных участков должна быть принята по возможности меньшей.

Для начальных интервалов времени, кроме того, можно было бы «пионерный» участок (т. е. последний участок, до которого на протяжении времени успевает распространиться неустановившийся режим, сопрягаемый с начальным установившимся режимом) разделить на несколько подучастков для более точного решения уравнения неразрывности. Уменьшение длины пионерного участка желательно потому, что изменения уровней и расходов воды на нем существенно отклоняются от линейного закона, причем в неодинаковой степени для различных створов: так, в начале участка уровни и расходы воды изменяются в течение всего интервала времени, в створе, расположенном посредине участка, — только в течение 0,5 Δt, а в конечном створе за время Δt начальный режим еще не нарушится, ибо к концу этого интервала времени фронт волны только дойдет до конца участка. Однако в расчетах неустановившегося движения при суточном регулировании, когда в качестве начального обычно принимается установившийся режим, отвечающий среднесуточному расходу воды, и расчеты доводятся до момента получения полного замкнутого цикла хода уровней и расходов в нескольких створах нижнего бьефа, такое усложнение расчетов также не вызывается необходимостью. Неточности в решении уравнения неразрывности

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

в первые интервалы времени практически мало влияют на конечные результаты расчета, в которые первые гидравлические «цепочки» обычно не включаются. (Эти первые «цепочки» характеризуют фиктивный режим перехода потока от условного начального установившегося состояния к волновому режиму при суточном регулировании.)

3. ВЫБОР РАСЧЕТНОГО ИНТЕРВАЛА ВРЕМЕНИ

Расчетный интервал времени принимается в зависимости от формы графика нагрузки, исходя из необходимости охвата всех переломных точек графика, учитывая при этом, что размер интервала времени определяет точность построений, т. е. чем меньше расчетный интервал времени, тем точнее определяются координаты результативных графиков изменения по времени уровней и расходов воды; с другой стороны, объем вычислительных работ прогрессивно возрастает с уменьшением Δt. Обычно расчетный интервал времени принимают равным одному часу, в отдельных случаях приходится уменьшать его до получаса. Брать большие расчетные интервалы времени не следует.

4. УЧЕТ ЗИМНИХ УСЛОВИЙ

В зимних условиях необходимо учитывать влияние ледяного покрова и наличие майны (открытого от льда участка) непосредственно ниже гидростанции. Наличие льда вызывает дополнительные потери на трение о нижнюю поверхность ледяного покрова, в связи с чем уменьшается пропускная способность русла. Поэтому расчетные графики вида $\left[Q_{\text{ср}} + \frac{W}{\Delta t} = f(Z', Z'')\right]$ для участков реки, покрытых льдом, нужно перестроить с учетом изменения в зимних условиях соотношения между емкостью русла на участке и пропускаемыми расходами воды. Графики, по которым определяется средний на участке расход воды — вида $Q_{\text{ср}} = f(Z', Z'')$ или $K_{\text{ср}} = f(Z_{\text{ср}})$, можно не перестраивать, достаточно уменьшить соответственно масштаб расходов (Q) или модулей расходов ($K_{\text{ср}}$).

Для участков, не покрытых льдом — в пределах майны, расчетные графики остаются такими же, как и для летних условий при достаточности принятого при их построении диапазона изменения уровней воды.

Длина майны принимается по соображению с данными специальных ледо-термических расчетов для холодных зим; обычно совмещают конец майны со вторым или третьим расчетным створом, принятым для условий свободного от льда русла, т. е.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

считают, что майна распространяется в пределах первого или первых двух расчетных участков. На кромке льда, т. е. в конце майны коэффициент уменьшения пропускной способности русла принимается таким же, как и для всего нижерасположенного участка реки, покрытого льдом, на основе имеющихся данных по ледовой обстановке. Этот же коэффициент принимается и для кривой расходов $Q=f(Z)$ в замыкающем створе, рассматриваемой как второе граничное условие.

5. ПРИБЛИЖЕННАЯ ОЦЕНКА РЕЖИМА ПИКОВЫХ МОЩНОСТЕЙ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Для приближенной оценки режима пиковых мощностей гидроэлектростанции строится обобщенная номограмма вида

$$N_{\text{пик}} = f(N_{\text{ср. сут}},\ Z_{\text{в. б}}).$$

Эта номограмма, показанная на фиг. 1, связывает значение пиковой располагаемой по напору мощности ($N_{\text{пик}}$) с среднесуточной мощностью гидростанции ($N_{\text{ср. сут}}$) и отметкой уровня воды в верхнем бьефе. Построение номограммы производится в следующем порядке по материалам детальных гидравлических расчетов неустановившегося движения в нижнем бьефе, выполненных для серии характерных графиков нагрузки. По данным этих расчетов строится зависимость между отклонением максимального уровня воды в нижнем бьефе гидростанции при суточном регулировании от среднесуточного уровня, соответствующего среднесуточной мощности, и разностью между максимальной и среднесуточной мощностью, т. е.

$$\Delta Z_{\text{н. б}} = Z_{\text{н. б}}^{\text{пик}} - Z_{\text{н. б}}^{\text{ср. сут}} = f(N_{\text{макс}} - N_{\text{ср. сут}})$$

или

$$\Delta Z_{\text{н. б}} = f(\Delta N).$$

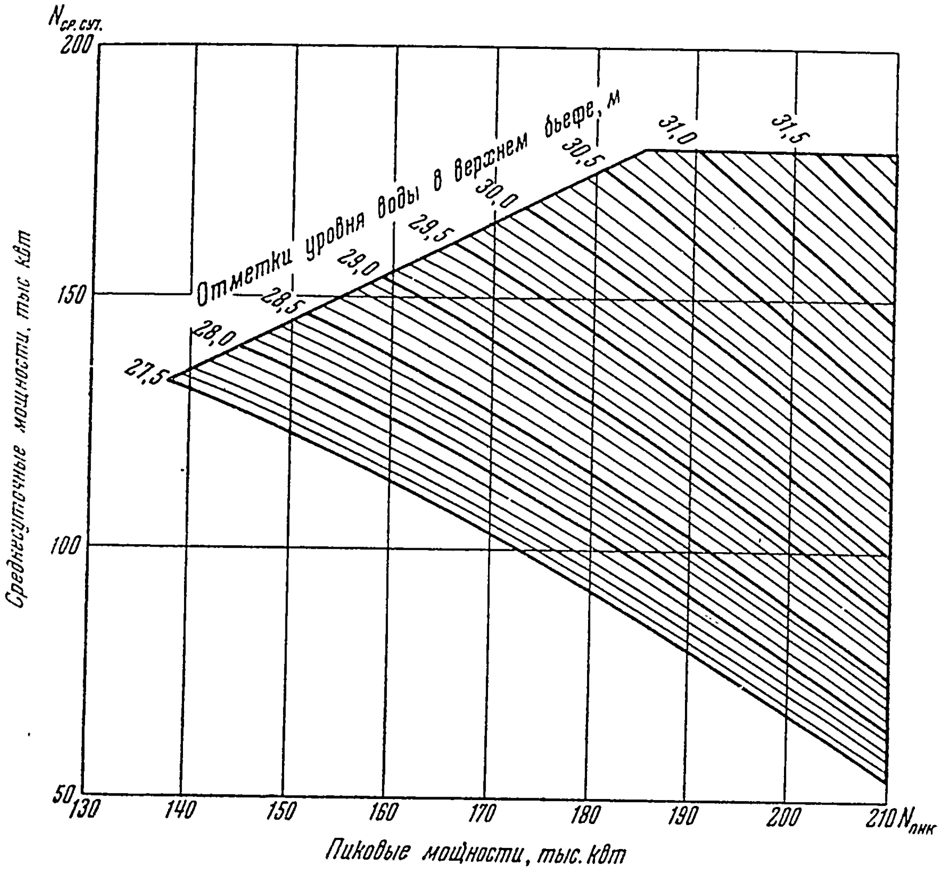
Вид такого графика показан на фиг. 2.

Аргумент зависимости, изображаемой графиком, — разность между максимальной и среднесуточной мощностями — не исчерпывающе определяет размах колебаний уровня нижнего бьефа. Оказывают влияние также длительность поддержания максимума нагрузки, характер ее нарастания от минимума к максимуму и т. д. Однако при рассмотрении определенной гидроэлектростанции, работающей в составе определенной энергосистемы, соотношения между элементами энергетического режима приобретают известную устойчивость

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

и, как показывает практика расчетов, точки на графике $\Delta Z_{н.б} = f(\Delta N)$ обычно размещаются достаточно закономерно, позволяя провести кривую, идущую от начала координат; в запас надежности эта кривая проводится как верхняя огибающая точек и экстраполируется вверх линейно до необхо-



Фиг. 1. Номограмма $N_{пик} = f(N_{ср. сут.}, Z_{в/б})$

димых пределов предполагаемого диапазона изменений ΔN и $\Delta Z_{н.б}$.

Дополнительными графиками, используемыми для построения упомянутой номограммы, являются:

а) универсальная характеристика гидромеханического оборудования гидростанции;

б) кривые зависимости мощности и расхода воды гидростанции при полной загрузке всех турбин от напора нетто, т. е. кривые $N_{пик} = f(H_{нетто})$ и $Q_{пик} = f(H_{нетто})$;

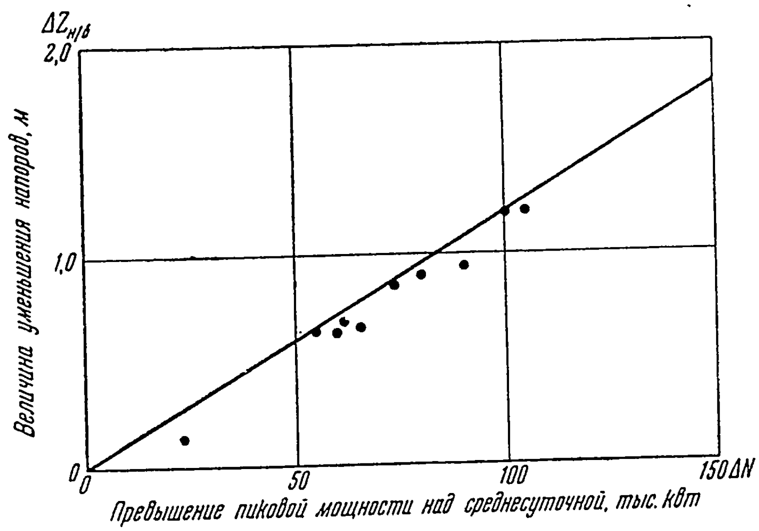
Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

в) кривые связи уровней с расходами воды в нижнем бьефе гидростанции;

г) кривые зависимости уровней воды в нижнем бьефе от средней мощности гидростанции и уровней воды в верхнем бьефе, т. е. кривые вида $Z_{н.б} = f(N_{ср.}, Z_{в.б})$.

Последнее семейство кривых, общий вид которого показан на фиг. 3, при необходимости строится для летних и для зимних условий. Исследование летнего режима напоров гидростанции при суточном регулировании не всегда является необходимым; летом условия работы турбин обычно значи-



Фиг. 2. График $\Delta Z_{н/б} = f(\Delta N)$

тельно лучше, чем в зимний период, из-за более низкого положения уровней воды в нижнем бьефе, и пиковые располагаемые по напору мощности с очевидностью равны установленной мощности гидростанции. В подобных случаях ограничиваются построением номограммы только для зимних условий и анализ режима пиковых мощностей производят для каждого месяца зимнего периода. При этом в качестве расчетной кривой расходов воды, по которой определяются уровни воды в нижнем бьефе, принимается кривая расходов, отвечающая холодной зиме; такой порядок построений не следует рассматривать как введение чрезмерного запаса надежности в результаты расчета, имея в виду ориентировочный характер основной зависимости $\Delta Z_{н.б} = f(\Delta N)$. Координаты семейства кривых $Z_{н.б} = f(N_{ср.}, Z_{в.б})$ вычисляют в таблицах формы 1 (см. стр. 275).

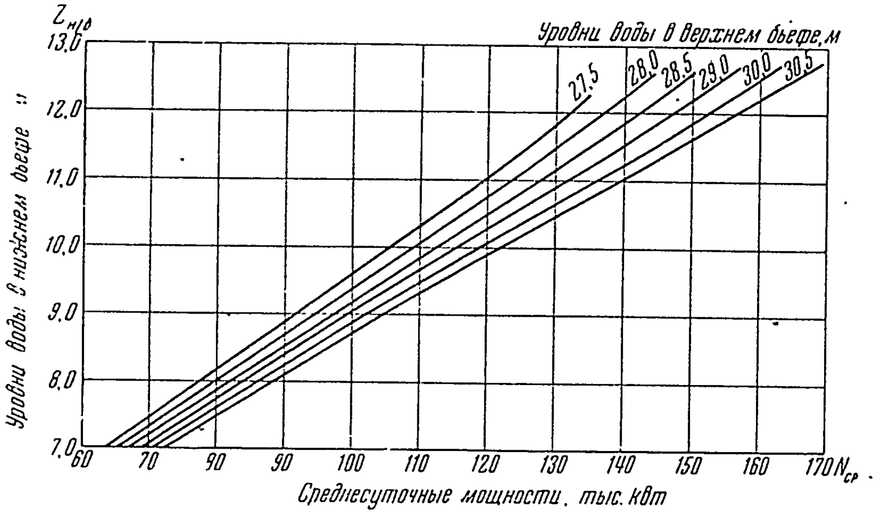
Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Порядок заполнения и вычислений по указанной таблице описывается ниже.

а) В первую колонку выписываем ряд значений отметок уровня воды в нижнем бьефе, охватывающий весь возможный диапазон колебаний уровней, с интервалом через 0,5 *м* (при малом диапазоне колебаний уровней интервал следует уменьшить до 0,2 *м*).

б) По расчетной кривой $Q = f(Z_{н.б})$ для каждой отметки $Z_{н.б}$ определяем значения $Q_{н.б}$ и вписываем их во вторую колонку.



Фиг. 3. Кривые зависимости уровней воды в нижнем бьефе от средней мощности гидростанции и уровней воды в верхнем бьефе

в) Расходы гидростанции $Q_{гэс}$ (третья колонка таблицы) получаем как разность между расходами воды в нижнем бьефе $Q_{н.б}$ и расходами воды, поступающими в нижний бьеф помимо гидростанции (зимой — фильтрационные потери, летом — фильтрационные потери и расходы воды на шлюзование).

г) Вычисляем значения напоров (нетто) как разность между каждой задаваемой отметкой уровня воды в верхнем бьефе, отметками уровня воды в нижнем бьефе и потерями напора в подводящих устройствах турбин гидроэлектростанции, т. е. $H_{нетто} = Z_{в.б} - Z_{н.б} - \Delta H$. Отметки уровня воды в верхнем бьефе принимаем по данным водохозяйственных расчетов в пределах всей призмы сработки водохранилища с интервалом через 0,5 *м* (при малой глубине сработки интервал следует уменьшить до 0,2 *м*).

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

д) Коэффициент мощности A, равный 9,81 $\eta_т \eta_г$, определяем для каждого значения напора (нетто) по характеристике гидромеханического оборудования гидроэлектростанции.

е) Среднюю мощность гидростанции $N_{ср}$ (колонки 6, 9 и т. д. таблицы) вычисляем по формуле: $N_{ср} = A \cdot Q \cdot H_{нетто}$. Дальнейшие расчеты по вычислению координат номограммы $N_{пик} = f(N_{ср.\,сут}, Z_{в.\,б})$ производим, пользуясь графиками $\Delta Z_{н.\,б} = f(\Delta N)$, $Z_{н.\,б} = f(N_{ср.}, Z_{в.\,б})$ и $N_{пик} = f(H_{нетто})$, в таблице формы 2.

Координаты упомянутой номограммы вычисляем для тех же значений отметок уровня воды в верхнем бьефе $Z_{в.\,б}$, которые были приняты при построении графиков $Z_{н.\,б} = f(N_{ср.}, Z_{в.\,б})$. Последующий порядок расчетов таков:

а) В колонку 2 таблицы заносим ряд произвольных значений $N_{ср.\,сут}$ в диапазоне от минимальной среднесуточной мощности, отвечающей условию снятия всей установленной мощности, до максимальной при круглосуточной работе всех турбин гидроэлектростанции, обеспечиваемой при данной отметке уровня верхнего бьефа; эти пределы устанавливаются подбором в результате последовательного заполнения всей таблицы.

б) Пользуясь графиком $Z_{н.\,б} = f(N_{ср.}, Z_{в.\,б})$, вписываем в колонку 3 таблицы значения отметок уровней воды в нижнем бьефе $Z_{н.\,б}^{ср.\,сут}$, соответствующих каждой величине среднесуточной мощности $N_{ср.\,сут}$.

в) Задаемся значением $N_{пик}$ и вычисляем $N_{пик.\,раб}$ как разность между $N_{пик}$ и величиной частотного резерва гидростанции ($N_{ч.\,рез}$). Если частотный резерв равен нулю, то $N_{пик.\,раб} = N_{пик}$.

г) Вычисляем $\Delta N = N_{пик.\,раб} - N_{ср.\,сут}$ и по графику $\Delta Z_{н.\,б} = f(\Delta N)$ находим соответствующее значение $\Delta Z_{н.\,б}$.

д) Определяем максимальную отметку уровня воды в нижнем бьефе при суточном регулировании по уравнению

$$Z_{н.\,б}^{пик} = Z_{н.\,б}^{ср.\,сут} + \Delta Z_{н.\,б}.$$

е) Далее вычисляем пиковые напоры — брутто и нетто — и по напору нетто проверяем по графику $N_{пик} = f(H_{нетто})$ значение пиковой мощности; если найденное по графику значение $N_{пик}$ совпадает с заданным в колонке 4, то вторичного расчета не требуется; в противном случае приходится, задавшись новым значением $N_{пик}$, повторить расчет (обычно двукратный подбор приводит к правильному решению). По данным 1, 2 и 4 колонок таблицы наносятся исходные линии расчетной номограммы, по которым строится вспомогательный график $N_{ср.\,сут} = f(Z_{в.\,б}, N_{пик})$; этот график используется для интерполяции номограммы по $Z_{в.\,б}$ с интервалом через 0,1 *м*.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Форма 1

$Z_{н. б. ср}$	$Q_{ср.}$		При $Z_{в. б}$			При $Z_{в. б}$		
	н.б	ГЭС	$H_{нетто}$	A	$N_{ср}$	$H_{нетто}$	A	$N_{ср.}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Форма 2

$Z_{в. б}$	$N_{ср. сут}$	$Z^{ср. сут}_{н. б}$	$N_{пик}$	$N_{пик. раб} = N_{пик} - N_{ч. рез}$	$\Delta N = N_{пик. раб} - N_{ср. сут}$	$\Delta Z_{н. б}$	$Z^{пик}_{н. б} = Z^{ср. сут}_{н. б} + \Delta Z_{н. б}$	Пиковый напор		$N_{пик}$
								$H_{брутто}$	$H_{нетто}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Построенная таким путем номограмма $N_{пик} = f(N_{ср.\ сут}, Z_{в.\ б})$ позволяет определить для любого интервала времени (в пределах того периода, для которого построена номограмма, т. е. лета или зимы) величину располагаемой по напору пиковой мощности в зависимости от положения уровня водохранилища ($Z_{в.\ б}$) и от среднесуточной мощности гидростанции ($N_{ср.\ сут}$). Следует при этом учесть, что из водохозяйственных расчетов по многолетнему календарному стоковому ряду можно заимствовать за каждый расчетный интервал времени отметку уровня верхнего бьефа и среднемесячную мощность ($N_{ср.\ мес}$); первая из этих двух величин — отметка уровня верхнего бьефа может быть непосредственно использована при оценке пиковой мощности (по всей вероятности, имеет смысл брать среднюю за интервал времени отметку), а вторую необходимо предварительно пересчитать в соответствующую величину среднесуточной мощности. Порядок такого пересчета определяется характером использования гидроэлектростанции в энергетической системе. Для рассматриваемых гидростанций, обладающих возможностью суточного и сезонного регулирования стока, наиболее полноценное использование их мощности достигается тогда, когда суточные и недельные колебания нагрузки энергетической системы покрываются за счет переменной во времени энергоотдачи гидростанции при сохранении возможно более равномерного режима на тепловых электростанциях. В связи с этим суточные графики нагрузки гидроэлектростанции для разных суток недели несколько отличаются друг от друга, что учитывается так называемым коэффициентом недельной неравномерности работы гидростанции (γ); этот коэффициент не вводится на ту долю суточной мощности, которая сохраняется изо дня в день неизменной по санитарным или навигационным ограничениям, именуемой базисной мощностью ($N_{баз}$). Кроме того, подлежат учету внутримесячные колебания мощности гидроэлектростанции, вызванные требованиями энергетической системы к работе гидростанции в период аварии с тепловыми турбоагрегатами. В этот период, продолжительностью обычно до 10—15 суток, среднесуточная мощность гидростанции увеличивается на величину предусмотренного на ней аварийного резерва мощности ($N_{ав.\ рез}$).

Таким образом, связь между среднемесячной мощностью гидростанции и максимальной среднесуточной ее мощностью может быть выражена следующей формулой:

$$N_{ср.\ сут} = \frac{N_{ср.\ мес} - N_{баз}}{\gamma} + N_{баз} + N_{ав.\ рез},$$

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

где $N_{ср.\ сут}$ — среднесуточная мощность;
$N_{ср.\ мес}$ — среднемесячная мощность;
$N_{баз}$ — мощность базовой части графика нагрузки;
γ — коэффициент недельной неравномерности;
$N_{ав.\ рез}$ — среднесуточная величина аварийного резерва мощности, принимаемого для гидростанции.

По приведенной формуле исчисляются значения среднесуточной мощности для всех интервалов времени, для которых значения среднемесячных мощностей равны или меньше соответствующих величин гарантированной среднемесячной мощности. В тех случаях, когда среднемесячная мощность больше гарантированной, но находится в пределах

$$N_{ср.\ мес.\ гарант} < N_{ср.\ мес} \leqslant N_{ср.\ сут.\ гарант},$$

величина среднесуточной мощности принимается равной $N_{ср.\ сут.\ гарант}$, т. е. соответствующей среднемесячной гарантированной мощности (за счет перехода гидростанции в более базовый режим работы и уменьшения благодаря этому необходимой доли среднесуточного аварийного резерва $N_{ав.\ рез}$). В остальных случаях, когда среднемесячная мощность за рассматриваемый интервал времени больше среднесуточной мощности, соответствующей среднемесячной гарантированной мощности, т. е. при $N_{ср.\ мес} > N_{ср.\ сут.\ гарант}$, среднесуточная мощность принимается равной среднемесячной.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Архангельский. Расчеты неустановившегося движения в открытых водотоках. Изд. АН СССР, 1947.
2. Я. Д. Гильденблат, В. В. Макулов, А. С. Семиколенов. Неустановившийся режим нижнего бьефа гидростанций. Сб. «Проблемы регулирования речного стока». Изд. АН СССР, вып. 2, 1947.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

П. А. ЛАБЗОВСКИЙ

РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ ВОЛН НА МЕЛКОВОДЬЕ

Известно, что на мелководье волны не достигают столь значительных величин, как в глубоководных районах моря. Причиной этого являются дополнительные потери волновой энергии, возникающие на мелководье под влиянием дна.

В последующем под термином «мелководные волны» будут подразумеваться волны, развивающиеся на той части акватории, глубины которой меньше длины волны, но больше глубины разбивания ее.

Уравнение баланса волновой энергии, данное проф. В. М. Маккавеевым [1], позволяет учесть влияние потерь и вычислить элементы мелководной волны, если известны выражения, определяющие характер этих потерь:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\gamma \frac{a^2}{2}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(\gamma \frac{a^2 u}{2}\right)-R_1+R_2=0. \tag{1}$$

Здесь a — амплитуда волны;

u — групповая скорость волн;

γ — удельный вес жидкости;

x — горизонтальная абсцисса, расположенная в плоскости движения;

t — время;

R_1 — энергия ветра, передающаяся воде в секунду на единицу массы;

R_2 — потери волновой энергии.

Энергия ветра, передаваемая воде, расходуется на следующие компоненты расходной части баланса волновой энергии:

1) образование и поддержание колебательного движения жидкости;

2) потери энергии на поверхности;

3) трение частиц воды внутри жидкости;

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

4) трение частиц воды о дно;

5) образование волн в грунте.

Суммарная величина потерь энергии R_2, в соответствии со сказанным, может быть представлена как сумма отдельных компонентов

$$R_2 = R_2^{I} + R_2^{II} + R_2^{III} + R_2^{IV}. \qquad (2)$$

Здесь R_2^{I} — потери энергии в поверхностном слое (образование гребней и т. п.);

R_2^{II} — потери на трение внутри жидкости;

R_2^{III} — потери на трение о дно;

R_2^{IV} — потери на образование донной волны.

Работы В. М. Маккавеева [2], В. Г. Андреянова [3], А. П. Браславского [4] и Н. Е. Кондратьева [5], посвященные определению указанных компонентов потерь, позволяют лишь весьма приближенно оценивать их, причем даже приближенное решение требует знания уклонов, характеристики грунтов и т. д.

Получение таких данных не всегда возможно, так как изыскания охватывают обычно участки, непосредственно связанные с проектируемыми сооружениями, в то время как для расчета волн необходимы данные по всей мелководной части разгона.

Таким образом, вычисление суммарных потерь энергии представляет весьма сложную задачу, и решение уравнения (1) для мелководья является возможным далеко не всегда.

Ниже предлагается приближенный способ определения элементов мелководных волн, основанный на теории волн бесконечно малой амплитуды на конечной глубине, с использованием эмпирических данных.

Из упомянутой теории следует, что период волны при переходе от глубокой воды на мелководье остается неизменным, в то время как скорость распространения волны и длина ее уменьшаются.

Таким образом, для одной и той же системы волн можно написать равенство

$$\tau_0 = \tau_1 \ \textit{сек}, \qquad (3)$$

где τ_0 — период глубоководной волны;

τ_1 — период мелководной волны.

Зависимость периода волны от ее длины и глубины в соответствии с упомянутой теорией будет

$$\tau = \sqrt{\frac{2\pi}{g} \lambda \operatorname{cth} 2\pi \frac{H}{\lambda}}. \qquad (4)$$

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Здесь λ — длина волны (*м*);
H — глубина воды (*м*);
g — ускорение силы тяжести (*м/сек*).

Полагая глубину воды на глубоководном участке весьма большой, а глубину на мелководном участке равной H, после подстановки этих значений глубины в выражение (4) получим соответственно

$$\tau_0 = \sqrt{\frac{2\pi}{g}\lambda_0}, \tag{5}$$

$$\tau_1 = \sqrt{\frac{2\pi}{g}\lambda_1 \operatorname{cth}\frac{2\pi H}{\lambda_1}}, \tag{6}$$

где λ_0 — длина глубоководной волны (*м*),
λ_1 — длина мелководной волны (*м*).

Подставляя (5) и (6) в (3) и производя упрощения, будем иметь

$$\lambda_0 = \lambda_1 \operatorname{cth} 2\pi \frac{H}{\lambda_1}. \tag{7}$$

Разделив глубину мелководного участка H на обе части уравнения (7), окончательно получим

$$\frac{H}{\lambda_0} = \frac{H}{\lambda_1} \operatorname{th} 2\pi \frac{H}{\lambda_1} \tag{8}$$

или

$$\frac{H}{\lambda_1} = \frac{H}{\lambda_0} \operatorname{cth} 2\pi \frac{H}{\lambda_1}. \tag{8a}$$

Уравнение (8) или (8a) позволяет вычислить длину мелководной волны, если известны глубина водоема в заданной точке и длина волны, которая имелась бы в условиях глубокой воды при заданной скорости ветра и разгоне; однако уравнение (8) не вполне удобно для вычислений, так как не может быть решено относительно λ_1.

Для простоты и удобства вычислений на фиг. 1 приведен график (сплошная линия), построенный по уравнению (8a) в виде

$$\frac{H}{\lambda_1} = f\left(\frac{H}{\lambda_0}\right). \tag{9}$$

Помимо графического решения уравнения (8a), нами сделана попытка подобрать функцию, допускающую решение относительно λ_1 и тождественную уравнению (8a) в пределах значений $\frac{H}{\lambda_0}$ от 0,01 до 1,0. Эти пределы включают все воз-

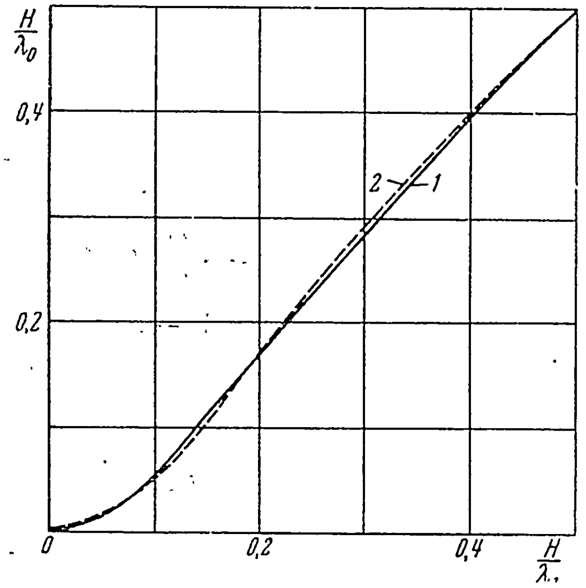
Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

можные соотношения глубины и длины волн, при которых будет проявляться влияние дна на элементы волн.

Новый вид функции (пунктирная линия на фиг. 1) имеет следующий вид:

$$\frac{H}{\lambda_1}=\frac{H}{\lambda_0}\,\mathrm{cth}\left(2\pi\frac{H}{\lambda_0}+\frac{1}{4}\,e^{-\frac{H}{\lambda_0}}\right), \qquad (10)$$



Фиг. 1. Зависимость между длинами глубоководной и мелководной волн

1 — по уравнению (8а); *2* — по уравнению (10)

откуда окончательно

$$\lambda_1=\lambda_0\,\mathrm{th}\left(2\pi\frac{H}{\lambda_0}+\frac{1}{4}\,e^{-\frac{H}{\lambda_0}}\right). \qquad (11)$$

Из фиг. 1 видно, что пунктирная кривая, нанесенная по уравнению (10), близко подходит к сплошной линии, построенной по уравнению (8а), и, таким образом, в указанных выше пределах уравнение (8) или (8а) может быть заменено уравнением (10).

Уравнение (11) позволяет рассчитать длину мелководных волн в соответствии с теорией волн малой амплитуды в идеальной жидкости.

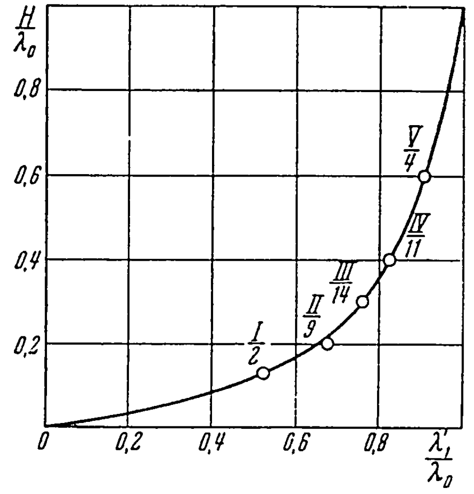
Для выяснения возможности применения полученного уравнения к расчетам элементов мелководных волн в реаль-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

ных условиях были сопоставлены результаты расчетов по уравнению (11) с натурными данными.

В формулу (11) входит длина глубоководной волны. В нашем распоряжении не было параллельных наблюдений над одной и той же системой волн одновременно на больших глубинах и на мелководье. Поэтому длины волн на участке глубокой воды вычислены по методу, предложенному автором [6].



Фиг. 2. Зависимость коэффициента уменьшения длины волны α от отношения $\frac{H}{\lambda_0}$

○ — центр тяжести группы точек; I—V — номера центров тяжести; 2, 4, 9, 11, 14 — числа точек, вошедших в группу

Наблюдавшиеся и вычисленные длины волн сопоставлены путем построения графика (фиг. 2) зависимости коэффициента уменьшения длины волны

$$\alpha = \frac{\lambda_1'}{\lambda_0} \text{ от отношения } \frac{H}{\lambda_0},$$

где λ_1' — измеренная в натуре длина мелководной волны;

λ_0 — длина глубоководной волны;

H — глубина точки, в которой определялась длина волны.

Полученное в результате поле точек имело значительный разброс из-за небольшой точности натурных наблюдений по вехам. Однако центры тяжести групп точек показали вполне определенный и достаточно ясно выраженный характер зависимости.

Уравнение (11) было выведено из теоретических представлений о равенстве периодов волн одной системы в условиях глубокой и мелкой воды. В действительности волновым процессам, происходящим в реальной жидкости, это предположение не соответствует. Периоды мелководных волн несколько больше периодов глубоководных волн. Поэтому в уравнение (11) необходимо ввести соответствующий коэффициент, после чего оно может быть переписано так:

$$\lambda = \sigma\lambda_1 = \sigma \operatorname{th}\left(2\pi\frac{H}{\lambda_0} + \frac{1}{4}e^{-\frac{H}{\lambda_0}}\right)\lambda_0, \tag{12}$$

где λ — длина мелководной волны для реальных условий.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Определяемый по эмпирическим данным коэффициент σ получился равным

$$\sigma = \left(\frac{H}{\lambda_0}\right)^{1/5}. \tag{13}$$

Если обозначить

$$\sigma \cdot \operatorname{th}\left(2\pi \frac{H}{\lambda_0} + \frac{1}{4} e^{-\frac{H}{\lambda_0}}\right) = \alpha,$$

то после подстановки вместо σ выражения (13) получим

$$\alpha = \left(\frac{H}{\lambda_0}\right)^{1/5} \operatorname{th}\left(2\pi \frac{H}{\lambda_0} + \frac{1}{4} e^{-\frac{H}{\lambda_0}}\right). \tag{14}$$

В работе 1952 г. [6] предложена эмпирическая зависимость

$$\alpha = \left(1 - e^{-\frac{3}{2}\pi \frac{H}{\lambda_0}}\right),$$

мало отличающаяся от (14).

Окончательно формула длины волны примет вид

$$\lambda = \alpha \lambda_0. \tag{15}$$

Зависимость для определения высоты волны может быть получена из следующих соображений относительно волновой энергии на поверхности моря.

Передача энергии от ветра воде зависит от топографии водной поверхности. Топографические характеристики водной поверхности при заданных величинах скорости ветра и разгона зависят от глубины моря. С уменьшением глубины скорость распространения волн уменьшается, а крутизна волн увеличивается. Уменьшение скорости распространения волн и увеличение крутизны увеличивают долю энергии, передаваемую ветром воде.

Одновременно с возрастанием притока энергии в условиях мелководья увеличиваются также потери энергии. Возникают дополнительные, по сравнению с условиями глубокой воды, потери на образование «грунтовых» волн. Увеличиваются потери энергии на трение внутри жидкости вследствие увеличения турбулентности, увеличиваются также потери энергии в поверхностном слое вследствие более частых сбросов энергии гребнями волн, достигших предельной крутизны.

Таким образом, увеличивающийся в условиях мелководья приток энергии компенсируется одновременным увеличением потерь ее, вследствие чего наступает своеобразное энергети-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

ческое равновесие, при котором насыщение воды энергией достигает определенной величины.

Сопоставляя величины волновой энергии на поверхности жидкости в условиях глубокой воды и в условиях мелководья, можно сделать вполне вероятное предположение, что энергия глубоководной волны и энергия мелководной волны в поверхностном слое, при прочих равных условиях, связаны между собою следующей зависимостью:

$$\frac{dE_1}{dz} = \delta \frac{dE_0}{dz}. \qquad (16)$$

Здесь $\frac{dE_1}{dz}$ — градиент по глубине энергии поверхностного слоя в условиях мелководья;

$\frac{dE_0}{dz}$ — то же в условиях глубокой воды;

z — координата глубины, направленная вниз от поверхности воды;

δ — коэффициент, учитывающий влияние глубины в реальных условиях.

Волновая энергия поверхностного слоя жидкости может быть получена из уравнений распределения энергии по глубине

$$\frac{dV}{dz} = \rho g \pi a^2 \frac{\operatorname{ch} 2k(z+H)}{\operatorname{sh} 2kH}, \qquad (17)$$

$$\frac{dT}{dz} = \rho g \pi a^2 \frac{\operatorname{sh} 2k(z+H)}{\operatorname{ch} 2kH - 1}. \qquad (18)$$

Здесь V — потенциальная энергия волны;

T — кинетическая энергия волны;

a — амплитуда волны;

ρ — плотность воды;

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_1}; \qquad (19)$$

остальные обозначения — прежние.

Градиент полной энергии поверхностного слоя будет равен

$$\frac{dE}{dz} = \frac{dV}{dz} + \frac{dT}{dz}. \qquad (20)$$

Для поверхности при $z=0$ после подстановки (17) и (18) в (20) и преобразований получим

$$\frac{dE}{dz} = \rho g \pi a^2 (\operatorname{cth} kH + \operatorname{cth} 2kH), \qquad (21)$$

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

или, положив для краткости,

$$\frac{(\operatorname{cth} kH + \operatorname{cth} 2kH)}{2} = \eta, \tag{22}$$

$$\frac{dE}{dz} = 2\rho g \pi \eta a^2. \tag{23}$$

Коэффициент η достигает единицы только в условиях глубокой воды ($H = \infty$), во всех других случаях $\eta > 1$.

Для условий глубокой воды

$$\frac{dE_0}{dz} = 2\rho g \pi a_0^2, \tag{24}$$

где a_0 — амплитуда глубоководной волны.

Для мелководной волны при глубине, равной H,

$$\frac{dE_1}{dz} = 2\rho g \pi \eta a_1^2, \tag{25}$$

где a_1 — амплитуда мелководной волны.

Подставляя полученные выражения (24) и (25) в уравнение (16) и положив

$$a_0 = \frac{h_0}{2}; \quad a_1 = \frac{h}{2}, \tag{26}$$

получим

$$\eta h^2 = \delta h_0^2, \tag{27}$$

где h_0 и h — соответственно высота глубоководной и мелководной волны (*м*).

Заменив η в соответствии с (22) в уравнении (27) и преобразовав его, получим

$$h = h_0 \sqrt{\delta} \sqrt{\frac{2 \operatorname{th} kH \cdot \operatorname{th} 2kH}{\operatorname{th} kH + \operatorname{th} 2kH}}. \tag{28}$$

Определение коэффициента δ произведено, так же как и коэффициента σ, эмпирическим путем.

Положим

$$\frac{h}{h_0} = \sqrt{\delta} \cdot \sqrt{\frac{2 \operatorname{th} 2\pi \frac{H}{\lambda_1} \cdot \operatorname{th} 4\pi \frac{H}{\lambda_1}}{\operatorname{th} 2\pi \frac{H}{\lambda_1} + \operatorname{th} 4\pi \frac{H}{\lambda_1}}} = \beta. \tag{29}$$

Для определения коэффициента β из данных непосредственных наблюдений в мелководных районах были избраны наибольшие отмеченные высоты волн при установившемся

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

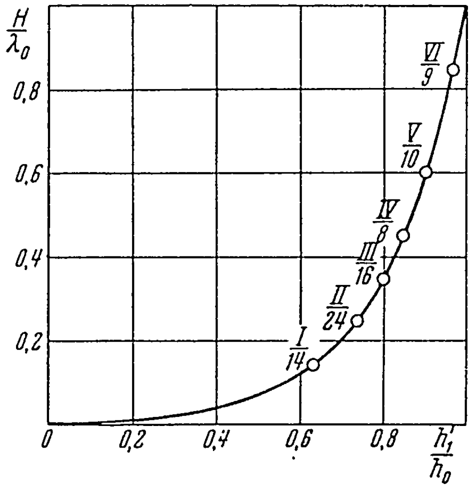
Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

волнении на профилях, где наблюдалось плавное изменение глубин при переходе волн от глубокой воды к мелководью.

По наблюдавшейся скорости ветра и разгону для каждой точки профиля вычислялась высота и длина волны глубокой воды.

По полученным данным был построен график $\frac{h_1'}{h_0}=f\left(\frac{H}{\lambda_0}\right)$, где h_1' — измеренная высота волны на мелководье. Точки дали значительный разброс из-за малой точности наблюдений, но, как видно из фиг. 3, центры тяжести групп точек расположились закономерно, описывая правильную кривую, в соответствии с которой коэффициент β принимает следующий вид:

$$\beta=\left(\frac{H}{\lambda_0}\right)^{1/5}\cdot\sqrt{\frac{2\,\mathrm{th}\,2\pi\frac{H}{\lambda_1}\cdot\mathrm{th}\,4\pi\frac{H}{\lambda_1}}{\mathrm{th}\,2\pi\frac{H}{\lambda_1}+\mathrm{th}\,4\pi\frac{H}{\lambda_1}}}\,. \quad (30)$$



Фиг. 3. Зависимость коэффициента уменьшения высоты волны β от отношения $\frac{H}{\lambda_0}$

О — центр тяжести группы точек; I—VI— номера центров тяжести; 8, 9, 10, 14, 16, 24 — числа точек, вышедших в группу

В окончательном виде формула для расчета высоты мелководных волн для средних максимумов будет иметь вид

$$h=h_0\beta. \quad (31)$$

Для акваторий, имеющих резкие переломы дна (например, для вновь построенных водохранилищ), расчет мелководных волн по указанным выше формулам производится по участкам, причем границами участков служат линии перегибов дна в районах малых глубин.

Расчетной глубиной для каждого участка считается глубина в конце его, а расчетным разгоном — полная длина участка по направлению действия ветра.

Размеры элементов волны, образующейся в результате воздействия ветра на протяжении двух или нескольких смежных участков, определяются путем последовательного сложения; приемы такого сложения даны ниже.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Пусть элементы волн в конце первого участка будут $h_{\rm I}$ и $\lambda_{\rm I}$, в конце второго участка $h_{\rm II}$ и $\lambda_{\rm II}$, а приращение высоты и длины на втором участке Δh и $\Delta\lambda$. Энергия волн на единицу поверхности в конце второго участка может быть выражена следующим образом:

$$E_{\rm II} = E_{\rm I} + \Delta E, \qquad (32)$$

где $E_{\rm II}$ — суммарная энергия волн в конце второго участка;
$E_{\rm I}$ — энергия волн в конце первого участка;
ΔE — приращение волновой энергии на протяжении второго участка.

Энергия волн на единицу поверхности выражается в общем виде зависимостью

$$E = \gamma \cdot h^2. \qquad (33)$$

После подстановки выражений $E_{\rm I} = \gamma h_{\rm I}^2$; $E_{\rm II} = \gamma h_{\rm II}^2$ и $\Delta E = \gamma \Delta h^2$ в (32) при $\gamma = 1$ получаем $h_{\rm II} = \sqrt{h_{\rm I}^2 + \Delta h^2}$.

Если допустить, что крутизна волны ε практически не зависит от разгона, то можно написать такого же вида формулу и для сложения длин волн по участкам, используя элементарное соотношение

$$h = \lambda \cdot \varepsilon, \qquad (35)$$

что после подстановки в (34) дает

$$\lambda_{\rm II} = \sqrt{\lambda_{\rm I}^2 + \Delta\lambda^2}. \qquad (36)$$

В условиях мелкой воды элементы волн на первом участке $h_{\rm I}$ и $\lambda_{\rm I}$ определяются в соответствии с изложенным ранее. Определение величин Δh и $\Delta\lambda$ с учетом влияния мелководья может быть выполнено следующим путем. Приращение высоты волны на втором участке может быть представлено как

$$\Delta h^2 = \Delta h_0^2 \cdot \beta_x, \qquad (37)$$

где Δh_0 — приращение высоты глубоководной волны на втором участке;
β_x — приведенный коэффициент, учитывающий влияние на высоту волны мелководья по всей длине обоих участков.

Теперь формула (34) может быть записана в виде

$$h_{\rm II} = \sqrt{h_{\rm I}^2 + \Delta h_0^2 \cdot \beta_x} \qquad (38)$$

и, аналогично,

$$\lambda_{\rm II} = \sqrt{\lambda_{\rm I}^2 + \Delta\lambda_0^2 \alpha_x}, \qquad (39)$$

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

где $\Delta\lambda_0$ — приращение длины волны на втором участке при глубокой воде;

α_x — приведенный коэффициент, учитывающий влияние на длину волны мелководья по всей длине обоих участков.

Общий вид зависимости для определения β_x и α_x выведен для участка водоема с горизонтальным дном, что привело к следующим формулам:

$$\beta_x = \beta_{II}^2 - \frac{h_{0,I}^2}{\Delta h_0^2}(\beta_I^2 - \beta_{II}^2), \qquad (40)$$

где $h_{0,I}$ — высота глубоководной волны, которая имела бы место при непрерывном разгоне и достаточной глубине;

β_I и β_{II} — коэффициенты по уравнению (30) для концов первого и второго участков, считая от начала разгона;

$$\alpha_x = \alpha_{II}^2 - \frac{\lambda_{0,I}^2}{\Delta\lambda_0^2}(\alpha_I^2 - \alpha_{II}^2), \qquad (41)$$

где $\lambda_{0,I}$ — длина глубоководной волны, которая имела бы место при непрерывном разгоне и достаточной глубине;

α_I и α_{II} — коэффициенты, учитывающие влияние мелководья на длину волн в конце первого и второго участков, считая от начала разгона.

Величина коэффициентов α_x и β_x при резких изменениях глубины может достигать любых значений, в том числе и отрицательных. Следует заметить, однако, что величина α_x или β_x, превышающая единицу, не имеет физического смысла, так как максимальный прирост волны на втором участке в условиях мелководья не может быть больше прироста волны на этом участке в условиях глубокой воды (Δh_0).

Что касается отрицательных значений α_x и β_x, то они будут иметь место при уменьшении глубины. Абсолютная величина их может превышать единицу, что будет указывать на преобладающий характер потерь энергии волны за счет мелководья по сравнению с приростом энергии волн за счет увеличения разгона.

После того как будут определены элементы волн в конце второго участка, можно приступить к расчету суммарной волны в конце следующего участка. Опять производится расчет по двум участкам, считая данными по первому участку суммированные элементы волн, полученные предыдущим расчетом.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

В этом случае коэффициенты α_{I} и β_{I} определятся из следующих отношений:

$$\alpha_{\text{I}} = \frac{\lambda_{\text{I}}}{\lambda_{0,\text{I}}}, \qquad (42)$$

$$\beta_{\text{I}} = \frac{h_{\text{I}}}{h_{0,\text{I}}}. \qquad (43)$$

Здесь h_{I} и λ_{I} — высота и длина волны, полученные в результате предыдущего расчета, т. е. для конца второго участка;

$h_{0,\text{I}}$ и $\lambda_{0,\text{I}}$ — элементы глубоководных волн, которые имели бы место для конца второго участка при непрерывном разгоне и достаточной глубине.

Глубоководные элементы волн h_0 и λ_0, входящие в выражения (15) и (31), определяются в зависимости от скорости ветра и разгона по соответствующим формулам для расчета элементов волн глубокой воды.

Автором в работе [6], а также в других работах были предложены следующие зависимости для расчета элементов волн глубокой воды:

$$h_0 = 0{,}073\ KW\sqrt{D\varepsilon}, \qquad (44)$$

$$\lambda_0 = 0{,}073\ W\sqrt{\frac{D}{\varepsilon}}, \qquad (45)$$

$$\frac{1}{\varepsilon} = \frac{\lambda_0}{h_0} = 9 + 19\, e^{-\frac{14}{W}}, \qquad (46)$$

$$K = 1 + e^{-0{,}4\frac{D}{W}}, \qquad (47)$$

$$D_0 = 30{,}0\ W^2\varepsilon, \qquad (48)$$

$$\tau_0 = 0{,}8\sqrt{\lambda_0}, \qquad (49)$$

$$C_0 = 1{,}25\sqrt{\lambda_0}. \qquad (50)$$

Здесь W — скорость ветра в *м/сек*;

D — разгон в *км*;

D_0 — предельный разгон в *км*;

ε — крутизна волны;

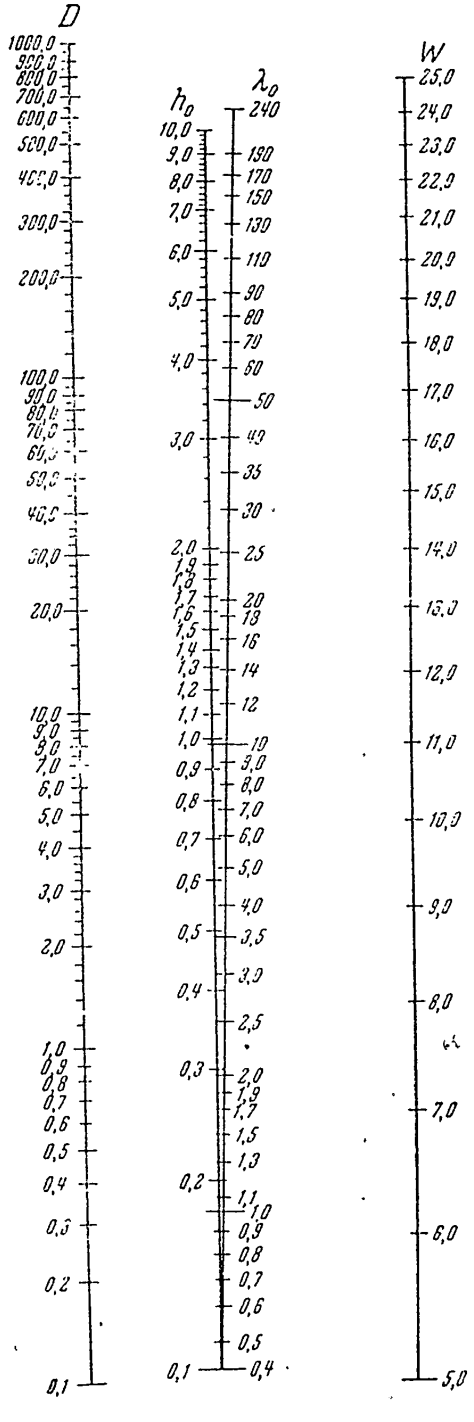
K — коэффициент, учитывающий повышенную интенсивность развития волн в начале разгона;

τ_0 — период глубоководных волн;

C_0 — скорость распространения глубоководных волн.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2



Фиг. 4. Номограмма для расчета ветровых волн

Для упрощения расчетов по формулам (15), (44), (45), (46), (48) и (31) приводятся табл. 1 и 2 и номограмма (фиг. 4).

Исходными данными для расчета мелководных волн являются элементы волн глубокой воды и характер распределения глубин на участке (профиль участка).

Элементы волн глубокой воды определяются по табл. 1 в зависимости от скорости ветра и величины разгона. Рекомендуется при этом придерживаться следующего порядка.

1. По заданной скорости ветра W определяется предельная величина разгона D_0 и крутизна волны ε. Скорости ветра помещены в четвертой горизонтальной графе табл. 1, предельные разгоны во второй графе, а крутизна волн ε — в третьей.

2. Предельный разгон D_0 сопоставляется с расстоянием от исследуемой точки до ближайшего наветренного берега, измеренным по карте. За действующий разгон D принимается меньшая из сравниваемых величин.

3. Элементы волн определяются по табл. 1 на пересечении граф скорости ветра и разгона D (вертикальная графа справа) или по формулам (44), (45), (49) и (50).

После того как будут определены элементы волн глубокой воды, вычисляется отношение $\frac{H}{\lambda_0}$,

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Предельные элементы волны	0,18 / 1,02	1,61 / 1,59	0,4 / 1,5	3,6 / 2,4	0,7 / 2,0	6,4 / 3,2	1,0 / 2,5	9,9 / 3,9	1,4 / 3,0	14,5 / 4,8	1,8 / 3,5	19,6 / 5,5	2,1 / 4,0	25,4 / 6,3
Предельные величины разгона D_0, *км*	13		49		29		73		106		134		160	
Крутизна волн ε	1/10		1/9		1/10		1/10		1/10		1/11		1/11	
Скорость ветра W, *м/сек.*	2		3		4		5		6		7		8	
	0,04 / 0,36	0,20 / 0,56	0,06 / 0,44	0,30 / 0,68	0,08 / 0,51	0,41 / 0,80	0,10 / 0,57	0,51 / 0,89	0,12 / 0,63	0,62 / 0,98	0,14 / 0,70	0,76 / 1,09	0,16 / 0,76	0,90 / 1,19
	0,06 / 0,45	0,31 / 0,70	0,10 / 0,55	0,48 / 0,86	0,13 / 0,64	0,64 / 1,00	0,16 / 0,72	0,81 / 1,13	0,19 / 0,80	0,96 / 1,21	0,22 / 0,88	1,20 / 1,36	0,23 / 0,95	1,42 / 1,49
	0,09 / 0,53	0,44 / 0,83	0,13 / 0,66	0,67 / 1,02	0,18 / 0,76	0,91 / 1,19	0,22 / 0,86	1,15 / 1,34	0,27 / 0,94	1,39 / 1,48	0,30 / 1,04	1,69 / 1,63	0,32 / 1,14	2,00 / 1,76
	0,11 / 0,63	0,63 / 0,99	0,18 / 0,78	0,95 / 1,22	0,24 / 0,90	1,28 / 1,41	0,30 / 1,02	1,61 / 1,59	0,37 / 1,12	1,97 / 1,77	0,41 / 1,21	2,30 / 1,90	0,45 / 1,35	2,84 / 2,10
	0,14 / 0,73	0,83 / 1,13	0,22 / 0,93	1,35 / 1,45	0,31 / 1,08	1,82 / 1,69	0,46 / 1,21	2,28 / 1,89	0,49 / 1,33	2,78 / 2,09	0,55 / 1,47	3,38 / 2,30	0,61 / 1,61	4,04 / 2,51
	0,15 / 0,84	1,09 / 1,31	0,26 / 1,01	1,65 / 1,58	0,36 / 1,19	2,23 / 1,86	0,45 / 1,33	2,78 / 2,08	0,57 / 1,48	3,40 / 2,31	0,65 / 1,63	4,15 / 2,54	0,73 / 1,78	4,91 / 2,78
	0,16 / 0,90	1,25 / 1,40	0,27 / 1,10	1,90 / 1,72	0,39 / 1,29	2,57 / 2,01	0,47 / 1,44	3,22 / 2,24	0,62 / 1,59	3,94 / 2,48	0,71 / 1,75	4,78 / 2,73	0,79 / 1,91	5,68 / 2,98
	0,17 / 0,96	1,40 / 1,45	0,29 / 1,17	2,13 / 1,82	0,41 / 1,36	2,88 / 2,12	0,52 / 1,52	3,60 / 2,38	0,66 / 1,68	4,40 / 2,62	0,76 / 1,86	5,40 / 2,90	0,85 / 2,02	6,37 / 3,15
			0,31 / 1,30	2,61 / 2,02	0,44 / 1,50	3,53 / 2,35	0,57 / 1,68	4,31 / 2,63	0,74 / 1,86	5,40 / 2,91	0,85 / 2,05	6,56 / 3,20	0,96 / 2,24	7,83 / 3,49
			0,34 / 1,35	3,00 / 2,16	0,48 / 1,62	4,06 / 2,52	0,6 / 1,8	5,1 / 2,8	0,8 / 2,0	6,3 / 3,1	0,9 / 2,2	7,6 / 3,4	1,0 / 2,4	9,0 / 3,8
					0,6 / 1,9	5,5 / 3,0	0,7 / 2,2	7,3 / 3,4	0,9 / 2,4	8,5 / 3,7	1,1 / 2,6	10,2 / 4,0	1,4 / 2,9	12,5 / 4,3
							0,9 / 2,4	8,8 / 3,7	1,1 / 2,6	10,8 / 4,1	1,2 / 2,9	13,1 / 4,5	1,4 / 3,2	15,6 / 4,9
									1,2 / 2,8	12,5 / 4,4	1,4 / 3,1	15,2 / 4,9	1,5 / 3,4	18,0 / 5,3
									1,4 / 3,0	14,9 / 4,7	1,5 / 3,3	16,9 / 5,1	1,7 / 3,6	20,1 / 5,6
											1,7 / 3,4	18,6 / 5,4	1,8 / 3,8	22,0 / 5,9
													2,0 / 3,9	23,8 / 6,1

Предельные элементы волны	2,7 / 4,5	32,5 / 7,1	3,1 / 5,1	40,0 / 7,9	3,7 / 5,6	48,4 / 8,7	4,1 / 6,1	57,8 / 9,5	4,5 / 6,6	67,6 / 10,3	5,4 / 7,0	77,2 / 11,1	5,7 / 7,6	90,4 / 11,9	6,… / 8,…
Предельные величины разгона D_0, *км*	202		231		279		306		338		392		422		
Крутизна волн ε	1/12		1/13		1/13		1/14		1/15		1/14		1/16		
Скорость ветра W, *м/сек.*	9		10		11		12		13		14		15		
	0,17 / 0,78	0,95 / 1,22	0,18 / 0,87	1,18 / 1,36	0,20 / 0,92	1,32 / 1,44	0,21 / 0,97	1,47 / 1,52	0,22 / 1,03	1,66 / 1,61	0,23 / 1,07	1,77 / 1,67	0,24 / 1,12	1,97 / 1,76	0,… / 1,…
	0,26 / 1,02	1,62 / 1,59	0,28 / 1,07	1,80 / 1,71	0,30 / 1,14	2,05 / 1,79	0,32 / 1,22	2,32 / 1,91	0,34 / 1,29	2,60 / 2,02	0,36 / 1,34	2,80 / 2,10	0,38 / 1,41	3,10 / 2,21	0,… / 1,…
	0,36 / 1,21	2,28 / 1,88	0,40 / 1,30	2,64 / 2,03	0,44 / 1,36	2,88 / 2,12	0,46 / 1,45	3,29 / 2,27	0,48 / 1,53	3,65 / 2,38	0,52 / 1,59	3,94 / 2,48	0,54 / 1,68	4,40 / 2,62	0,… / 1,…
	0,52 / 1,44	3,24 / 2,25	0,55 / 1,54	3,72 / 2,42	0,60 / 1,62	4,10 / 2,53	0,64 / 1,72	4,64 / 2,70	0,67 / 1,83	5,20 / 2,84	0,72 / 1,89	5,58 / 2,95	0,74 / 2,00	6,24 / 3,12	0,… / 2,…
	0,70 / 1,72	4,58 / 2,66	0,73 / 1,84	5,28 / 2,87	0,82 / 1,92	5,70 / 3,00	0,88 / 2,06	6,60 / 3,21	0,93 / 2,14	7,30 / 3,40	1,09 / 2,26	7,97 / 3,53	1,04 / 2,38	8,85 / 3,72	1,… / 2,…
	0,82 / 1,89	5,58 / 2,95	0,89 / 2,03	6,43 / 3,17	0,98 / 2,12	7,02 / 3,32	1,05 / 2,27	8,05 / 3,55	1,11 / 2,40	9,00 / 3,75	1,19 / 2,50	9,70 / 3,88	1,25 / 2,63	10,8 / 4,10	1,… / 2,…
	0,91 / 2,04	6,50 / 3,18	0,99 / 2,18	7,42 / 3,40	1,10 / 2,28	8,10 / 3,57	1,18 / 2,44	9,32 / 3,82	1,24 / 2,58	10,4 / 4,03	1,35 / 2,68	11,2 / 4,18	1,41 / 2,84	12,48 / 4,40	1,… / 2,…
	0,99 / 2,16	7,25 / 3,37	1,07 / 2,31	8,32 / 3,61	1,19 / 2,42	9,14 / 3,78	1,28 / 2,60	10,42 / 4,12	1,34 / 2,74	11,68 / 4,28	1,46 / 2,84	12,5 / 4,40	1,51 / 2,98	13,90 / 4,66	1,… / 3,…
	1,11 / 2,38	8,88 / 3,73	1,21 / 2,58	10,4 / 4,03	1,36 / 2,70	11,4 / 4,22	1,47 / 2,86	12,78 / 4,48	1,54 / 3,02	14,25 / 4,72	1,68 / 3,13	15,3 / 4,88	1,78 / 3,30	17,05 / 5,15	1,… / 3,…
	1,2 / 2,6	10,2 / 4,0	1,2 / 2,7	11,3 / 4,2	1,5 / 2,9	13,0 / 4,5	1,6 / 3,1	14,6 / 4,6	1,7 / 3,3	16,5 / 5,1	1,8 / 3,4	17,5 / 5,2	1,9 / 3,6	19,7 / 5,6	2,… / 3,…
	1,4 / 3,0	14,4 / 4,8	1,5 / 3,3	16,6 / 5,1	1,7 / 3,4	18,3 / 5,3	1,9 / 3,6	20,9 / 5,7	1,9 / 3,8	23,3 / 6,0	2,1 / 4,0	24,5 / 6,2	2,3 / 4,2	27,8 / 6,6	2,… / 4,…
	1,6 / 3,5	19,0 / 5,4	1,7 / 3,6	20,4 / 5,6	1,9 / 3,8	22,4 / 5,9	2,1 / 4,0	25,5 / 6,3	2,2 / 4,3	28,5 / 6,7	2,4 / 4,4	30,6 / 6,9	2,6 / 4,7	34,1 / 7,3	2,… / 5,…
	1,8 / 3,6	20,5 / 5,7	1,9 / 3,9	23,6 / 6,1	2,1 / 4,1	25,8 / 6,3	2,3 / 4,4	30,4 / 6,9	2,5 / 4,6	33,0 / 7,2	2,5 / 4,8	35,4 / 7,4	2,8 / 5,0	39,4 / 7,8	2,… / 5,…
	1,9 / 3,8	22,9 / 6,0	2,1 / 4,1	26,3 / 6,4	2,4 / 4,3	28,8 / 6,7	2,6 / 4,6	31,0 / 7,2	2,7 / 4,8	36,0 / 7,6	2,8 / 5,0	39,6 / 7,9	2,9 / 5,3	44,0 / 8,3	3,… / 5,…
	2,1 / 4,0	25,0 / 6,2	2,2 / 4,3	28,8 / 6,7	2,5 / 4,5	31,7 / 7,0	2,6 / 4,8	36,1 / 7,5	2,8 / 5,1	40,4 / 8,0	3,0 / 5,4	44,4 / 8,2	3,1 / 5,6	48,4 / 8,7	3,… / 5,…
	2,3 / 4,2	27,6 / 6,5	2,4 / 4,5	31,2 / 7,0	2,6 / 4,7	34,2 / 7,3	2,8 / 5,0	38,9 / 7,8	3,0 / 5,3	43,5 / 8,2	3,2 / 5,5	46,7 / 8,6	3,3 / 5,8	52,1 / 9,0	3,… / 0,…
	2,4 / 4,3	29,0 / 6,7	2,6 / 4,6	33,4 / 7,2	2,8 / 4,8	36,5 / 7,6	3,0 / 5,2	41,6 / 8,1	3,1 / 5,5	47,0 / 8,6	3,4 / 5,7	50,0 / 8,8	3,5 / 6,0	55,6 / 9,3	3,… / 0,…
	2,6 / 4,4	30,8 / 7,0	2,7 / 4,8	35,4 / 7,4	3,0 / 5,0	38,8 / 7,8	3,2 / 5,3	44,1 / 8,3	3,3 / 5,6	49,0 / 8,8	3,6 / 5,8	53,0 / 9,1	3,8 / 6,1	59,0 / 9,6	3,… / 0,…
			2,9 / 4,9	37,3 / 7,6	3,1 / 5,1	40,8 / 8,0	3,3 / 5,5	46,6 / 8,5	3,4 / 5,8	52,0 / 9,0	3,7 / 6,0	56,0 / 9,4	3,9 / 6,3	62,2 / 9,9	4,… / 0,…
			3,0 / 5,0	39,2 / 7,7	3,3 / 5,2	42,8 / 8,2	3,5 / 5,6	48,8 / 8,7	3,7 / 5,9	54,4 / 9,2	3,9 / 6,1	58,6 / 9,6	4,1 / 6,5	65,4 / 10,1	4,… / 6,…
					3,4 / 5,3	44,7 / 8,4	3,6 / 5,7	51,1 / 8,9	3,8 / 6,1	57,0 / 9,4	4,1 / 6,4	61,2 / 9,8	4,3 / 6,6	68,1 / 10,3	4,… / 6,…
					3,7 / 5,5	46,6 / 8,5	3,8 / 5,9	53,8 / 9,2	4,0 / 6,2	59,3 / 9,6	4,2 / 6,4	63,8 / 10,0	4,4 / 6,7	71,0 / 10,5	4,… / 7,…
							3,9 / 6,0	55,1 / 9,3	4,1 / 6,3	61,5 / 9,8	4,4 / 6,5	66,2 / 10,2	4,6 / 6,9	73,8 / 10,7	4,8 / 7,2
							4,0 / 6,1	57,0 / 9,4	4,2 / 6,4	63,8 / 10,0	4,6 / 6,6	68,3 / 10,3	4,8 / 7,0	76,2 / 10,9	4,… / 7,…
											4,9 / 6,9	74,0 / 10,8	5,1 / 7,3	82,3 / 11,3	5,… / 7,…
											5,… / 7,1	79,0 / 11,1	5,5 / 7,5	88,0 / 11,8	5,… / 7,…
															6,… / 8,…

Схема расположения элементов волн в квадратах

h_0	λ_0
τ_0	c_0

h_0 — высота волны

λ_0 — длина волны

τ_0 — период волны

c_0 — скорость распространения волны

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
[illegible] 57,8 / [illegible] 9,[illegible]	5,5 67,0 / 6,6 10,3	5,4 77,2 / 7,0 11,1	5,7 90,4 / 7,6 11,9	6,1 102,7 / 8,1 12,7	6,5 116,0 / 8,6 13,5	7,2 129,0 / 9,1 14,2	7,6 144,8 / 9,6 15,0	8,4 160,0 / 10,1 15,8	9,3 176,3 / 10,6 16,6	9,7 193,8 / 11,1 17,4	10,6 211,8 / 11,6 18,2	11,5 230,7 / 12,2 19,0	12,5 250,0 / 12,6 19,8	13,5 271,6 / 13,2 20,6	14,6 289,7 / 13,6 21,3	15,6 313,8 / 14,2 22,1	16,8 336,0 / 14,7 23,0	18,0 / 15,2
568	348	392	422	452	482	540	570	631	696	726	794	864	937	1014	1094	1170	1262	13[illegible]
1/14	1/15	1/15	1/16	1/17	1/18	1/18	1/19	1/19	1/19	1/20	1/20	1/20	1/20	1/20	1/20	1/20	1/20	1/2[illegible]
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	3[illegible]
[illegible]	0,22 1,67 / 1,04 1,61	0,23 1,77 / 1,07 1,65	0,25 1,97 / 1,12 1,70	0,26 2,1[illegible] / 1,18 1,8	[illegible] / 1,2 1,9[illegible]	0,28 2,49 / 1,27 1,98	[illegible] 2,71 / [illegible] 2,0[illegible]	0,30 2,8[illegible] / 1,35 2,11	0,30 2,96 / 1,38 2,16	0,32 3,21 / 1,33 2,23	0,34 3,39 / 1,37 2,3	0,35 3,51 / 1,50 2,35	0,36 3,62 / 1,53 2,39	0,38 3,80 / 1,56 2,44	0,39 3,9[illegible] / 1,59 2,48	0,41 4,08 / 1,60 2,51	0,42 4,20 / 1,64 2,56	0,44 / 1,08
[illegible]	[illegible] 2,6[illegible] / 1,2[illegible] 2,0[illegible]	0,56 2,8 / [illegible] 2,1[illegible]	0,58 3,1[illegible] / 1,31 2,23	[illegible] 3,42 / 1,38 [illegible]	0,61 3,72 / 1,54 2,42	[illegible] 3,97 / 1,59 2,48	[illegible] [illegible] / 1,66 2,5[illegible]	0,47 [illegible] / 1,70 2,6[illegible]	0,48 4,7[illegible] / 1,71 2,7[illegible]	0,50 5,0[illegible] / 1,81 2,82	0,51 5,3[illegible] / 1,85 2,8[illegible]	0,53 5,52 / 1,87 2,9[illegible]	0,56 5,7 / 1,9[illegible] 3,0[illegible]	0,59 6,05 / 1,97 3,09	0,62 6,23 / 2,10 3,1[illegible]	0,64 6,44 / 2,03 3,18	0,66 6,62 / 2,16 3,22	0,68 / 2,11
[illegible]	0,58 3,05 / 1,43 2,5[illegible]	0,52 3,37 / 1,59 2,39	[illegible] 3,50 / 1,68 2,62	0,76 3,85 / 1,76 2,70	0,78 5,2[illegible] / 1,73 2,88	1,01 5,50 / 1,80 2,9[illegible]	0,63 6,16 / 1,97 3,08	0,68 6,30 / 2,02 3,1	0,71 6,67 / 2,16 3,2[illegible]	0,73 7,2[illegible] / 2,1[illegible] 3,3[illegible]	0,77 7,4 / 2,20 [illegible]	0,80 7,8[illegible] / 2,25 3,3[illegible]	0,84 8,10 / 2,29 3,58	0,85 8,5[illegible] / 2,33 3,62	0,87 8,81 / 2,38 3,71	0,91 9,1[illegible] / 2,42 3,78	0,93 9,41 / 2,36 3,84	0,96 / 2,52
[illegible]	0,67 5,[illegible] / 1,81 2,8[illegible]	0,72 5,[illegible] / 1,80 2,9[illegible]	0,77 6,2[illegible] / 2,06 3,2[illegible]	0,78 6,83 / 2,10 3,28	0,81 7,47 / 2,18 3,4[illegible]	0,85 7,87 / 2,21 3,5[illegible]	0,88 8,5[illegible] / 2,31 3,6[illegible]	0,93 9,0 / 2,36 3,7	0,98 9,3[illegible] / 2,36 3,8[illegible]	1,00 10,20 / 2,50 3,9[illegible]	1,05 10,6[illegible] / 2,61 4,08	1,07 11,0[illegible] / 2,66 4,1[illegible]	1,12 11,52 / 2,72 4,25	1,18 12,0[illegible] / 2,78 4,3[illegible]	1,22 12,4[illegible] / 2,82 4,4[illegible]	1,27 12,88 / 2,88 4,5[illegible]	1,2[illegible] 13,30 / 2,92 4,5[illegible]	1,35 / 2,99
[illegible]	0,93 7,[illegible] / 2,14 [illegible]	1,00 7,6 / 2,26 3,5[illegible]	1,04 8,8 / 2,38 3,7[illegible]	1,08 9,63 / 2,4[illegible] 3,8[illegible]	1,12 10,5[illegible] / 2,50 4,0[illegible]	1,18 11,1[illegible] / 2,67 4,10	1,22 12,1[illegible] / 2,73 4,2[illegible]	1,28 12,72 / 2,83 4,5[illegible]	1,3[illegible] 13,50 / 2,92 [illegible]	1,3[illegible] 15,9[illegible] / 3,0[illegible] 4,7	1,45 15,0[illegible] / 3,10 4,8[illegible]	1,51 15,65 / 3,17 4,8[illegible]	1,58 16,45 / 3,24 5,03	1,63 17,0[illegible] / 3,30 5,1[illegible]	1,70 17,6[illegible] / 3,[illegible] 5,2[illegible]	1,77 18,5[illegible] / 3,42 5,3[illegible]	1,8[illegible] 18,78 / 3,47 5,42	1,80 / 3,50
[illegible]	1,11 9,[illegible] / 2,39 3,7	1,19 9,70 / 2,50 3,8[illegible]	1,25 10,8 / 2,63 4,1[illegible]	1,29 11,8 / 2,75 [illegible]	1,34 12,8[illegible] / 2,87 [illegible]	1,42 13,6 / 2,96 4,6[illegible]	1,47 14,6 / 3,09 4,8[illegible]	1,56 15,68 / 3,17 4,97	1,62 16,[illegible] / 3,26 5,0[illegible]	1,68 17,71 / 3,37 5,20	1,76 18,[illegible] / 3,41 5,[illegible]	1,82 19,2[illegible] / 3,51 5,[illegible]	1,90 19,95 / 3,58 5,58	1,98 20,8[illegible] / 3,66 5,72	2,04 21,[illegible] / 3,70 5,7[illegible]	2,15 22,32 / 3,79 5,9[illegible]	2,2[illegible] 23,08 / 3,8[illegible] 6,01	2,27 / 3,95
[illegible]	1,2[illegible] 10,[illegible] / 2,58 [illegible]	1,3[illegible] 11,2 / 2,68 4,18	1,41 12,38 / 2,8[illegible] 4,4	1,46 13,68 / 2,90 4,62	1,51 14,88 / 3,00 4,8	1,60 15,70 / 3,17 4,9[illegible]	1,66 17,18 / 3,2[illegible] 5,18	1,73 18,02 / 3,30 5,31	1,80 18,9[illegible] / 3,38 5,4[illegible]	1,90 20,38 / 3,61 5,6[illegible]	1,93 21,22 / 3,63 5,77	2,05 22,1[illegible] / 3,77 5,8	2,16 23,09 / 3,8[illegible] 6,01	2,23 24,1[illegible] / 3,93 6,1[illegible]	2,33 24,88 / 4,0[illegible] 6,2[illegible]	2,43 25,6[illegible] / 4,06 6,3[illegible]	[illegible] 26,6[illegible] / 4,13 6,[illegible]	2,01 / 4,24
[illegible]	1,25 [illegible] / 2,74 [illegible]	1,46 12,5 / 2,8[illegible] [illegible]	1,53 13,9 / 2,98 [illegible]	1,59 15,28 / 3,13 4,88	1,6[illegible] 16,6[illegible] / 3,28 5,0[illegible]	1,76 17,67 / 3,76 5,2[illegible]	1,84 19,3 / 3,52 5,38	1,9[illegible] 20,18 / 3,60 5,62	2,03 21,1[illegible] / 3,68 5,7[illegible]	2,10 22,7[illegible] / 3,8[illegible] 5,9[illegible]	2,19 [illegible] / 3,90 [illegible]	2,27 24,8 / 3,98 6,2[illegible]	2,38 25,7[illegible] / 4,06 6,3[illegible]	2,49 26,8[illegible] / 4,15 6,49	2,59 27,8 / 4,22 6,5[illegible]	2,70 28,8[illegible] / 4,30 6,72	2,8[illegible] 29,6[illegible] / 4,36 6,81	2,82 / 4,48
[illegible]	1,55 1[illegible] / 3,02 [illegible]	1,68 15,4 / 3,13 4,8[illegible]	1,78 17,02 / [illegible] 5,1[illegible]	1,8[illegible] 18,70 / 3,36 5,31	1,91 20,30 / 3,44 5,60	2,06 21,37 / 3,72 5,81	2,15 24,4[illegible] / 3,57 6,0[illegible]	2,2[illegible] 24,67 / 3,98 6,2[illegible]	2,37 25,8[illegible] / 4,07 6,[illegible]	2,36 27,0[illegible] / 4,26 6,60	2,58 29,11 / 4,32 [illegible]	2,64 30,4[illegible] / 4,41 6,88	2,76 31,59 / 4,50 7,05	2,93 32,9[illegible] / 4,60 7,18	3,06 34,2[illegible] / 4,68 7,30	3,21 35,67 / 4,70 7,4[illegible]	[illegible] 36,3[illegible] / 4,83 7,[illegible]	3,39 / 4,96
[illegible]	1,7 1[illegible] / [illegible]	1,8 17,[illegible] / [illegible]	1,9 19,7 / 3,0 [illegible]	2,1 21,6 / 3,7 5,9	2,2 23,9 / 3,8 6,1	2,3 24,9 / 4,0 6,2	2,4 27,1 / 4,2 6,5	2,5 28,5 / 4,3 6,7	2,6 29,9 / 4,4 6,8	2,7 [illegible] / 4,5 7,1	2,9 [illegible] / 4,6 7,2	3,0 35,0 / 4,7 7,4	3,2 36,5 / 4,8 7,6	3,3 38,0 / 4,9 7,7	3,4 39,4 / 5,0 7,8	3,6 40,6 / 5,1 8,0	3,7 42,1 / 5,2 8,1	3,8 / 5,3
[illegible]	1,9 21 / 3,8 6,[illegible]	2,1 2[illegible] / 4,0 6,2	2,3 27,8 / [illegible] 6,6	2,4 30,2 / [illegible] 7,0	2,5 32,3 / 4,6 7,1	2,7 35,0 / [illegible] 7,3	2,9 36,6 / [illegible] 7,8	3,1 [illegible] / 5,2 8,0	3,2 42,0 / 5,3 8,1	3,4 45,2 / [illegible] 8,4	3,6 48,1 / 5,5 8,7	3,8 49,6 / 5,6 8,8	3,9 51,5 / 5,7 9,0	4,1 53,9 / 5,8 9,2	4,3 55,7 / 6,0 9,3	4,5 57,5 / 6,1 9,5	4,7 59,[illegible] / 6,2 9,6	4,8 / 6,3
[illegible]	2,2 28,[illegible] / [illegible] 6,[illegible]	2,4 30,6 / [illegible] 6,9	2,6 34,1 / 4,7 7,3	2,8 38,4 / 5,0 7,8	2,8 41,0 / 5,1 8,0	3,0 42,7 / 5,2 8,2	3,2 47,3 / 5,4 8,6	3,4 49,3 / 5,6 8,8	3,6 50,9 / 5,7 8,9	3,8 55,3 / 5,9 9,2	4,0 58,3 / 6,1 9,5	4,2 60,8 / 6,2 9,8	4,4 63,2 / 6,4 9,9	4,6 65,9 / 6,5 10,1	4,9 68,1 / 6,6 10,3	5,1 70,6 / 6,7 10,5	5,3 72,5 / 6,8 10,7	5,4 / 7,0
[illegible]	2,5 29,6 / 4,6 7,[illegible]	2,5 30,6 / [illegible] 7,[illegible]	2,8 33,4 / 5,0 7,8	2,9 35,5 / 5,3 8,3	3,0 37,0 / 5,5 8,6	3,2 39,5 / 5,6 8,8	3,4 51,6 / 5,8 9,0	3,6 57,0 / 6,0 9,3	3,8 59,6 / 6,2 9,6	4,0 64,4 / 6,4 10,0	4,2 67,2 / 6,6 10,3	4,4 70,0 / 6,7 10,5	4,6 72,4 / 6,8 10,6	4,9 76,2 / 7,0 10,9	5,3 78,8 / 7,1 11,1	5,5 81,4 / 7,2 11,3	5,7 84,1 / 7,4 11,5	5,9 / 7,5
[illegible]	2,7 36,9 / 5,8 7,6	2,8 39,6 / [illegible] 7,9	2,9 41,0 / 5,3 8,3	3,0 48,2 / 5,6 8,7	3,2 52,7 / 5,8 9,1	3,4 55,7 / 6,0 9,3	3,6 60,6 / 6,2 9,7	3,8 63,8 / 6,4 10,0	4,0 66,6 / 6,5 10,2	4,2 71,7 / 6,8 10,6	4,4 75,2 / 7,0 10,9	4,7 78,4 / 7,1 11,1	4,9 81,4 / 7,2 11,3	5,2 84,3 / 7,4 11,6	5,5 88,1 / 7,5 11,8	5,7 91,2 / 7,6 12,0	6,0 95,1 / 7,8 12,2	6,2 / 8,0
[illegible]	2,8 40,4 / 5,1 8,0	[illegible] / [illegible] 8,[illegible]	3,1 46,6 / 5,6 8,7	3,3 51,2 / 5,9 9,2	3,5 57,8 / 6,1 9,5	3,6 60,4 / 6,2 9,8	3,8 65,5 / 6,5 10,3	4,0 69,7 / 6,7 10,4	4,2 73,2 / 6,8 10,7	4,4 78,4 / 7,1 11,1	4,6 82,6 / 7,3 11,4	4,9 85,8 / 7,4 11,6	5,2 89,2 / 7,6 11,8	5,4 93,4 / 7,7 12,1	5,7 96,6 / 7,9 12,3	6,0 100,0 / 8,0 12,5	6,2 104,0 / 8,1 12,7	6,4 / 8,3
[illegible]	3,0 41 / 5,4 8,[illegible]	3,2 36,7 / [illegible]	3,3 52,1 / 5,8 9,0	3,6 58,6 / 6,1 9,6	3,6 62,4 / 6,3 9,9	3,8 66,6 / [illegible] 10,2	4,0 71,6 / 6,8 10,6	4,2 75,5 / 7,0 10,9	4,4 78,7 / 7,1 11,1	4,6 84,8 / 7,4 11,5	4,8 88,6 / 7,5 11,8	5,1 92,6 / 7,7 12,0	5,4 96,7 / 7,9 12,3	5,6 100,0 / 8,1 12,5	5,9 104,4 / 8,2 12,8	6,2 107,9 / 8,3 13,0	6,5 111,3 / 8,4 13,2	6,6 / 8,6
[illegible] 51,6 / [illegible] 8,4	3,1 [illegible] / [illegible]	3,3 [illegible] / 5,7 [illegible]	3,5 56,[illegible] / 6,0 9,3	3,7 61,0 / 6,3 9,8	3,8 66,7 / 6,5 10,2	4,0 70,5 / 6,7 10,5	4,2 76,5 / 7,0 10,9	4,4 80,7 / 7,2 11,2	4,6 85,2 / 7,4 11,5	4,8 91,1 / 7,6 11,9	5,0 96,2 / 7,8 12,2	5,4 99,5 / 8,0 12,5	5,6 103,9 / 8,1 12,7	5,8 107,8 / 8,3 13,0	6,1 111,5 / 8,5 13,2	6,4 115,3 / 8,6 13,4	6,7 119,0 / 8,7 13,6	6,8 / 9,0
[illegible] 44,1 / [illegible] 8,4	3,3 [illegible] / 5,6 [illegible]	3,6 [illegible] / 5,8 9,1	3,8 60,0 / 6,1 9,6	3,9 64,8 / 6,4 10,0	4,0 70,6 / 6,7 10,5	4,2 74,6 / 6,9 10,8	4,4 81,4 / 7,2 11,2	4,6 85,4 / 7,4 11,6	4,8 89,5 / 7,6 11,8	5,0 96,6 / 7,9 12,3	5,2 100,8 / 8,2 12,6	5,5 105,3 / 8,3 12,8	5,8 109,0 / 8,4 13,1	6,0 114,3 / 8,6 13,3	6,3 118,4 / 8,7 13,6	6,6 122,3 / 8,9 13,9	7,0 126,1 / 9,0 14,0	7,1 / 9,2
[illegible] 46,6 / [illegible] 8,5	3,5 [illegible] / 5,8 9,0	3,7 [illegible] / 6,0 9,4	3,9 62,2 / 6,3 9,9	4,0 68,2 / 6,6 10,3	4,2 71,5 / 6,9 10,8	4,4 78,5 / 7,1 11,1	4,6 85,8 / 7,4 11,6	4,8 90,1 / 7,6 11,9	5,0 94,6 / 7,8 12,2	5,2 101,9 / 8,1 12,6	5,5 106,3 / 8,3 12,9	5,7 110,6 / 8,4 13,2	6,0 114,9 / 8,6 13,4	6,3 120,5 / 8,8 13,8	6,6 124,4 / 8,9 14,0	6,9 128,8 / 9,1 14,2	7,2 133,2 / 9,2 14,4	7,3 / 9,4
[illegible] 48,8 / [illegible] 8,7	3,7 53,4 / [illegible] 9,2	3,9 [illegible] / 6,1 9,6	4,1 64,4 / 6,5 10,1	4,4 71,6 / 6,8 10,6	4,4 78,2 / 7,1 11,1	4,6 82,5 / 7,3 11,5	4,8 90,0 / 7,6 11,8	5,0 94,6 / 7,8 12,2	5,3 98,9 / 8,0 12,5	5,5 106,6 / 8,2 12,9	5,7 111,6 / 8,5 13,2	6,0 116,3 / 8,6 13,5	6,2 120,6 / 8,8 13,8	6,5 126,6 / 9,0 14,1	6,8 131,0 / 9,1 14,3	7,1 135,2 / 9,3 14,5	7,4 139,5 / 9,5 14,8	7,6 / 9,7
[illegible] 51,1 / [illegible]	[illegible] 57,0 / [illegible] 9,4	4,1 61,2 / [illegible] 9,8	4,3 68,1 / 6,6 10,3	4,5 75,1 / 6,9 10,8	4,6 81,3 / 7,2 11,2	4,8 86,3 / 7,5 11,6	5,0 91,3 / 7,8 12,1	5,2 98,7 / 8,0 12,4	5,5 104,3 / 8,1 12,7	5,7 111,4 / 8,5 13,2	6,0 116,9 / 8,7 13,5	6,2 121,4 / 8,9 13,8	6,5 125,6 / 9,0 14,0	6,7 132,0 / 9,2 14,4	7,0 136,5 / 9,4 14,6	7,3 141,1 / 9,5 14,9	7,6 145,8 / 9,7 15,1	7,8 / 9,9
[illegible]	4,0 59,2 / 6,2 9,6	4,2 63,8 / 6,4 10,0	4,4 71,0 / 6,7 10,5	4,6 78,0 / 7,0 11,1	4,8 84,8 / 7,3 11,5	5,0 90,4 / 7,6 11,8	5,1 97,8 / 7,9 12,3	5,4 103,6 / 8,2 12,8	5,7 107,6 / 8,3 13,0	5,9 116,7 / 8,6 13,4	6,1 121,0 / 8,8 13,8	6,4 126,0 / 9,0 14,0	6,7 130,9 / 9,2 14,3	6,9 137,4 / 9,4 14,7	7,3 141,9 / 9,5 14,9	7,6 147,0 / 9,7 15,2	7,9 151,3 / 9,8 15,4	8,0 / 10,1
[illegible]	4,1 61,[illegible] / [illegible] 9,8	4,3 66,2 / 6,5 10,2	4,6 73,8 / 6,9 10,7	4,8 80,6 / 7,2 11,2	4,9 88,0 / 7,7 11,7	5,2 93,0 / 7,7 12,1	5,4 101,7 / 8,1 12,6	5,6 106,8 / 8,3 12,9	5,9 111,7 / 8,5 13,2	6,1 120,4 / 8,8 13,8	6,4 125,9 / 9,1 14,3	6,6 131,1 / 9,2 14,3	6,9 136,2 / 9,4 14,6	7,2 142,7 / 9,6 15,0	7,5 147,4 / 9,7 15,2	7,8 152,7 / 9,9 15,5	8,1 157,4 / 10,0 15,7	8,3 / 10,3
[illegible] 57,0 / [illegible]	4,2 64,8 / 6,4 10,0	4,6 68,3 / 6,6 10,4	4,8 76,2 / 7,0 10,9	4,9 84,5 / 7,3 11,4	5,1 91,4 / 7,6 12,0	5,4 95,8 / 7,8 12,2	5,6 105,7 / 8,2 12,9	5,8 110,2 / 8,4 13,1	6,1 115,6 / 8,6 13,5	6,3 125,0 / 9,0 14,0	6,6 130,1 / 9,1 14,2	6,8 135,5 / 9,3 14,6	7,2 140,1 / 9,5 14,8	7,4 147,7 / 9,7 15,2	7,7 152,6 / 9,9 15,5	8,0 157,8 / 10,0 15,7	8,3 162,7 / 10,2 16,0	8,5 / 10,5
		4,9 71,0 / 6,9 10,8	5,1 82,3 / 7,[illegible] 11,3	5,3 90,0 / 7,6 11,8	5,5 94,3 / 8,0 12,4	5,8 104,0 / 8,2 13,0	6,0 113,5 / 8,5 13,3	6,3 119,4 / 8,7 13,6	6,6 124,7 / 9,0 14,0	6,7 134,4 / 9,3 14,5	7,1 140,3 / 9,5 14,8	7,3 145,3 / 9,7 15,1	7,6 152,3 / 9,9 15,4	7,9 159,0 / 10,1 15,8	8,2 164,9 / 10,3 16,1	8,6 170,6 / 10,5 16,4	9,0 175,8 / 10,6 16,6	9,1 / 10,9
		5,1 79,0 / 7,1 11,1	5,5 88,0 / 7,5 11,8	5,7 96,4 / 7,9 12,3	5,8 105,2 / 8,2 12,8	6,2 112,5 / 8,5 13,2	6,4 122,5 / 8,9 13,9	6,8 127,2 / 9,0 14,1	7,0 134,1 / 9,2 14,5	7,2 143,6 / 9,6 15,0	7,5 150,3 / 9,8 15,3	7,8 156,7 / 10,0 15,6	8,1 162,9 / 10,2 16,0	8,5 170,0 / 10,4 16,3	8,8 176,3 / 10,6 16,6	9,2 182,4 / 10,8 16,8	9,6 188,0 / 11,0 17,1	9,7 / 11,3
				6,0 102,5 / 8,1 12,7	6,2 113,5 / 8,5 13,4	6,5 118,0 / 8,7 13,6	6,8 128,5 / 9,1 14,1	7,2 135,0 / 9,3 14,5	7,4 141,5 / 9,5 14,9	7,7 152,5 / 9,9 15,5	7,9 159,3 / 10,1 15,8	8,3 166,3 / 10,3 16,1	8,6 173,0 / 10,5 16,4	9,0 180,7 / 10,8 16,8	9,3 186,7 / 11,0 17,1	9,8 193,6 / 11,1 17,4	10,1 199,4 / 11,[illegible] 17,6	10,3 / 11,6
						6,9 124,0 / 8,3 14,0	7,1 135,2 / 9,3 14,6	7,5 142,4 / 9,6 14,9	7,8 149,1 / 9,8 15,4	8,1 161,0 / 10,2 15,9	8,4 167,9 / 10,4 16,2	8,8 175,1 / 10,6 16,6	9,0 182,2 / 10,8 16,9	9,5 190,3 / 11,0 17,2	9,8 197,1 / 11,2 17,6	10,2 204,1 / 11,4 17,9	10,4 210,7 / 11,6 18,2	10,9 / 11,9
						7,2 130,0 / 9,1 14,3	7,5 142,5 / 9,6 15,0	7,9 149,7 / 9,8 15,3	8,2 158,7 / 10,0 15,6	8,5 169,2 / 10,4 16,2	8,8 176,3 / 10,6 16,6	9,2 184,3 / 10,9 17,0	9,3 191,3 / 11,1 17,3	9,9 199,8 / 11,3 17,7	10,3 207,8 / 11,5 18,0	10,7 213,4 / 11,7 18,2	11,1 220,5 / 11,8 18,7	11,4 / 12,2
								8,2 156,5 / 10,0 15,6	8,6 164,0 / 10,2 16,0	8,8 177,7 / 10,6 16,6	9,2 184,3 / 10,9 17,0	9,6 192,2 / 11,1 17,3	10,0 199,9 / 11,3 17,7	10,4 208,1 / 11,5 18,0	10,8 216,1 / 11,8 18,4	11,3 224,5 / 12,0 18,7	11,7 230,8 / 12,2 19,1	11,9 / 12,5
										9,2 183,7 / 10,8 17,0	9,6 192,0 / 11,1 17,4	10,0 199,7 / 11,3 17,6	10,4 207,7 / 11,5 18,0	10,8 216,6 / 11,8 18,4	11,3 224,7 / 12,0 18,8	11,7 232,3 / 12,2 19,1	12,1 239,7 / 12,4 19,4	12,4 / 12,7
												10,4 207,6 / 11,5 18,0	10,8 215,9 / 11,8 18,4	11,2 225,5 / 12,0 18,8	11,6 233,4 / 12,2 19,1	12,1 241,4 / 12,4 19,4	12,6 248,7 / 12,6 19,7	12,9 / 13,0
												10,7 214,6 / 11,7 18,3	11,2 223,7 / 12,0 18,7	11,6 232,9 / 12,2 19,1	12,1 242,0 / 12,5 19,5	12,5 249,9 / 12,6 19,8	13,1 257,6 / 12,9 20,1	13,3 / 13,2
														12,0 241,2 / 12,[illegible] 19,4	12,4 248,9 / 12,6 19,8	12,9 257,4 / 12,8 20,1	13,5 266,5 / 13,1 20,4	13,7 / 13,4
																13,4 265,7 / 13,0 20,4	13,9 274,8 / 13,3 20,6	14,2 / 13,6
																	14,3 282,6 / 14,4 21,0	14,6 / 13,8

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Таблица

76,3 56,6	9,7 193,5 11,1 17,5	10,6 211,8 11,6 18,2	11,5 229,7 12,2 19,0	12,5 250,0 12,6 19,5	13,5 271,0 13,2 20,6	14,6 289,7 13,6 21,3	15,6 313,8 14,2 22,1	16,8 336,6 14,7 23,0	18,0 360,9 15,2 23,8	19,2 384,7 15,7 24,5	20,5 410,2 16,2 25,3	21,8 436,0 16,7 26,1	23,2 464,1 17,2 26,9	24,5 490,6 17,8 27,7	
	726	79[illegible]	864	937	1014	1094	1176	1262	1350	1442	1536	1634	1742	1838	
	1/23	1/[illegible]	1/[illegible]	1/[illegible]	1/[illegible]	1/[illegible]	1/[illegible]	1/[illegible]	1/[illegible]	1/[illegible]	1/[illegible]	1/[illegible]	1/[illegible]	1/[illegible]	
1	22	2[illegible]	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	Patron вкм D км
2,9 2,10	0,32 3,21 1,34 2,23	0,34 3,39 1,47 2,29	0,35 3,51 1,50 2,44	0,36 3,66 1,53 2,39	0,38 3,80 1,56 2,44	0,39 3,94 1,59 2,48	0,41 4,08 1,60 2,51	0,42 4,20 1,64 2,59	0,44 4,42 1,68 2,63	0,44 4,54 1,71 2,67	0,46 4,70 1,74 2,71	0,48 4,83 1,76 2,7	0,49 4,93 1,78 2,78	0,51 5,09 1,81 2,82	0,2
4,7 2,7	0,50 5,01 1,81 2,8	0,51 5,3 1,84 2,8	0,54 5,5 1,84 2,9	0,56 5,77 1,92 3,0	0,59 6,0 1,97 3,05	0,62 6,23 2,00 3,1	0,64 6,4 2,03 3,18	0,66 6,6 2,06 3,2	0,68 6,98 2,11 3,3	0,71 7,22 2,15 3,3	0,73 7,4 2,18 3,41	0,75 7,62 2,21 3,4	0,77 7,8 2,23 3,5	0,81 8,03 2,27 3,5	0,5
6,67 3,22	0,73 7,29 2,15 3,39	0,77 7,51 2,20 3,4	0,80 7,8 2,24 3,5	0,84 8,10 2,29 3,58	0,85 8,52 2,34 3,6	0,87 8,81 2,38 3,71	0,91 9,1 2,42 3,78	0,93 9,31 2,46 3,85	0,96 9,6 2,52 3,93	0,99 10,21 2,56 4,0	1,03 10,5 2,59 4,07	1,06 10,78 2,62 4,11	1,09 11,09 2,67 4,17	1,12 11,3 2,70 4,22	1,0
9,4 3,8	1,00 10,29 2,56 3,96	1,05 10,6 2,61 4,08	1,07 11,14 2,66 4,10	1,12 11,52 2,72 4,25	1,18 12,06 2,78 4,3	1,22 12,41 2,82 4,41	1,27 12,88 2,88 4,4	1,32 13,31 2,92 4,54	1,35 13,96 2,96 4,67	1,40 14,4 3,04 4,7	1,45 14,85 3,06 4,8	1,50 15,29 3,13 4,8	1,54 15,67 3,17 4,9	1,59 16,1 3,21 5,01	2,0
13,30 4,4	1,39 14,3 3,04 4,7	1,45 14,9 3,10 4,8	1,51 15,6 3,17 4,9	1,58 16,27 3,2 5,05	1,64 17,14 3,30 5,10	1,70 17,6 3,36 5,25	1,77 18,5 3,42 5,3	1,83 18,78 3,47 5,42	1,86 19,8 3,56 5,5	1,94 20,27 3,60 5,6	2,01 21,0 3,67 5,73	2,08 21,47 3,71 5,8	2,16 22,1 3,77 5,8	2,24 22,8 3,83 5,9	4,0
16,4 5,0	1,68 17,71 3,47 5,2	1,76 18,47 3,54 5,29	1,82 19,2 3,61 5,4	1,90 19,96 3,68 5,5	1,98 20,8 3,64 5,7	2,06 21,43 3,70 5,78	2,15 22,3 3,79 5,9	2,22 23,08 3,86 6,01	2,27 24,24 3,93 6,17	2,35 25,01 4,00 6,27	2,44 25,77 4,06 6,3	2,53 26,31 4,11 6,4	2,62 27,06 4,17 6,51	2,71 27,81 4,23 6,61	6,0
18,9 5,3	1,90 20,5 3,61 5,6	1,99 21,3 3,69 5,77	2,05 22,11 3,77 5,8	2,16 23,19 3,85 6,01	2,23 24,1 3,93 6,14	2,34 24,88 4,00 6,2	2,45 25,6 4,06 6,3	2,55 26,6 4,14 6,40	2,61 27,95 4,21 6,6	2,70 28,77 4,29 6,70	2,80 29,77 4,36 6,81	2,88 30,70 4,43 6,9	2,98 31,41 4,48 7,01	3,08 32,23 4,54 7,10	8,0
21,11 5,7	2,10 22,7 3,82 5,9	2,19 23,7 3,90 6,1	2,27 24,8 3,9 6,2	2,38 25,75 4,06 6,3	2,48 26,8 4,14 6,49	2,59 27,8 4,2 6,5	2,70 28,8 4,30 6,72	2,80 29,46 4,38 6,81	2,8 31,27 4,48 7,0	2,98 32,3 4,55 7,11	3,08 34,21 4,61 7,21	3,19 35,0 4,68 7,31	3,31 35,14 4,75 7,4	3,44 36,0 4,80 7,5	10
25,87 6,5	2,46 27,0 4,23 6,61	2,5 28,11 4,32 6,77	2,64 29,2 4,41 6,89	2,76 31,59 4,50 7,0	2,90 32,9 4,60 7,18	3,06 34,2 4,68 7,31	3,21 35,47 4,76 7,4	3,30 36,52 4,84 7,55	3,39 38,3 4,96 7,72	3,54 39,4 5,04 7,88	3,68 40,6 5,11 7,9	3,81 41,78 5,17 8,0	3,95 44,0 5,25 8,2	4,10 44,4 5,32 8,31	15
24,9 6,8	2,7 32,2 4,5 7,1	2,9 34,6 4,6 7,2	3,0 35,0 4,7 7,4	3,2 36,5 4,8 7,6	3,3 38,0 4,9 7,7	3,4 39,4 5,0 7,8	3,6 40,6 5,1 8,0	3,7 42,1 5,2 8,1	3,8 44,2 5,3 8,3	4,0 45,5 5,4 8,4	4,2 47,0 5,5 8,6	4,3 48,2 5,6 8,7	4,4 49,5 5,6 8,8	4,6 50,9 5,7 8,9	20
42,0 8,1	3,4 45,2 5,4 8,4	3,6 48,1 5,5 8,7	3,8 49,6 5,6 8,8	3,9 51,5 5,7 9,0	4,1 53,9 5,8 9,2	4,3 55,7 6,0 9,3	4,5 57,5 6,1 9,5	4,7 59,4 6,2 9,6	4,8 62,5 6,3 9,9	5,0 64,3 6,4 10,0	5,3 66,2 6,5 10,2	5,5 68,1 6,6 10,3	5,7 69,9 6,7 10,4	5,9 72,0 6,8 10,6	40
50,9 8,9	3,8 54,4 5,9 9,2	4,0 58,3 6,1 9,6	4,2 60,8 6,2 9,8	4,4 63,2 6,4 9,9	4,6 65,9 6,5 10,1	4,9 68,1 6,6 10,3	5,1 70,6 6,7 10,5	5,3 72,8 6,8 10,7	5,4 76,6 7,0 10,9	5,8 78,9 7,1 11,1	6,0 81,1 7,2 11,3	6,2 83,4 7,3 11,4	6,4 85,8 7,4 11,6	6,7 88,2 7,5 11,8	60
59,6 9,6	4,0 64,4 6,4 10,0	[illegible] 67,2 [illegible] 10,3	4,5 70,0 6,7 10,5	4,6 72,4 6,8 10,6	4,9 76,2 7,0 10,9	5,2 78,8 7,1 11,1	5,5 81,4 7,2 11,3	5,7 84,1 7,3 11,5	5,9 88,5 7,5 11,8	6,2 91,2 7,6 12,0	6,4 94,1 7,8 12,1	6,7 96,4 7,9 12,3	7,0 99,4 8,0 12,5	7,2 101,7 8,1 12,6	80
66,6 10,2	4,2 71,7 6,8 10,6	4,4 75,2 7,0 10,9	4,7 78,4 7,1 11,1	4,9 81,4 7,2 11,3	5,2 84,3 7,4 11,6	5,5 88,1 7,5 11,8	5,7 91,2 7,6 12,0	6,0 94,1 7,8 12,2	6,2 99,0 8,0 12,4	6,5 102,1 8,1 12,6	6,7 105,0 8,2 12,8	7,0 107,8 8,3 13,0	7,3 111,3 8,4 13,2	7,7 114,0 8,6 13,3	100
74,2 10,7	4,4 78 7,1 11,1	4,6 82,6 7,3 11,4	4,9 85,8 7,4 11,6	5,2 89,2 7,6 11,8	5,4 93,4 7,7 12,1	5,7 96,6 7,9 12,3	6,0 100,0 8,0 12,5	6,2 103,0 8,1 12,7	6,4 108,2 8,3 13,0	6,7 111,8 8,5 13,2	7,0 114,9 8,6 13,4	7,3 118,0 8,7 13,6	7,6 121,5 8,8 13,8	7,9 124,6 9,0 13,8	120
78,7 11,1	4,6 [illegible] 7,4 11,5	4,8 88,6 7,5 11,8	5,1 92,6 7,7 12,0	5,4 96,7 7,9 12,3	5,6 100,9 8,1 12,6	5,9 104,4 8,2 12,8	6,2 107,9 8,3 13,0	6,5 111,3 8,4 13,2	6,6 116,9 8,6 13,5	7,0 120,7 8,8 13,8	7,2 124,0 8,9 13,9	7,6 127,7 9,0 14,1	7,9 131,1 9,2 14,3	8,2 134,5 9,3 14,5	140
84,2 11,5	4,8 91,1 7,6 11,9	5,0 95,2 7,8 12,2	5,4 99,4 8,0 12,5	5,6 103,0 8,1 12,7	5,8 107,8 8,3 13,0	6,1 111,5 8,5 13,2	6,4 115,3 8,6 13,4	6,7 119,0 8,7 13,6	6,8 125,1 9,0 14,0	7,2 128,8 9,1 14,2	7,5 132,7 9,2 14,4	7,8 136,3 9,4 14,6	8,1 140,4 9,5 14,8	8,4 143,9 9,6 15,0	160
89,5 11,8	5,0 96,6 7,9 12,3	5,2 101,8 8,0 12,4	5,6 105,3 8,2 12,8	5,8 109,0 8,4 13,1	6,0 114,3 8,6 13,4	6,3 118,4 8,7 13,6	6,6 122,3 8,9 13,9	7,0 126,1 9,0 14,0	7,1 132,7 9,2 14,4	7,4 136,9 9,4 14,6	7,7 140,7 9,5 14,9	8,0 144,7 9,6 15,0	8,3 148,6 9,8 15,2	8,6 152,4 9,9 15,5	180
94,6 12,2	[illegible] 101,9 8,1 12,6	5,5 106,3 8,3 12,9	5,7 110,6 8,4 13,2	6,0 114,9 8,6 13,4	6,3 120,5 8,8 13,8	6,6 124,4 8,9 14,0	6,9 128,8 9,1 14,2	7,2 133,2 9,2 14,4	7,3 139,7 9,4 14,8	7,6 144,0 9,6 15,0	7,9 148,0 9,8 15,2	8,3 152,6 9,9 15,5	8,6 156,7 10,0 15,7	8,9 161,2 10,2 15,9	200
98,9 12,4	5,5 106,6 8,2 12,9	5,7 111,6 8,5 13,2	5,9 116,2 8,6 13,5	6,2 120,6 8,8 13,8	6,5 126,6 9,0 14,1	6,8 131,0 9,2 14,3	7,1 135,2 9,3 14,5	7,4 139,5 9,4 14,8	7,6 146,4 9,7 15,1	7,8 151,4 9,8 15,4	8,2 155,6 10,0 15,6	8,6 159,8 10,1 15,8	8,8 164,5 10,3 16,0	9,2 168,6 10,4 16,2	220
103,3 12,7	5,7 111,4 8,5 13,2	6,0 116,9 8,7 13,5	6,2 121,1 8,8 13,8	6,4 125,6 9,0 14,0	6,7 132,0 9,2 14,4	7,0 136,5 9,4 14,6	7,3 141,1 9,5 14,9	7,6 145,8 9,7 15,1	7,8 153,0 9,9 15,5	8,1 158,0 10,1 15,8	8,4 162,6 10,2 16,0	8,7 166,9 10,3 16,2	9,1 171,6 10,5 16,4	9,4 176,4 10,6 16,6	240
107,6 13,0	5,9 116,7 8,6 13,5	6,1 121,0 8,8 13,8	6,4 126,0 9,0 14,0	6,7 130,9 9,2 14,3	6,9 137,4 9,4 14,7	7,3 141,9 9,5 14,9	7,6 147,0 9,7 15,2	7,9 151,3 9,8 15,4	8,0 159,4 10,1 15,8	8,3 164,5 10,3 16,0	8,7 169,1 10,4 16,2	9,0 173,7 10,5 16,5	9,4 178,7 10,7 16,8	9,8 184,7 10,9 17,0	260
111,7 13,2	6,1 120,4 8,8 13,8	6,4 127,9 9,0 14,0	6,6 131,1 9,2 14,4	6,9 136,2 9,4 14,6	7,2 142,7 9,6 15,0	7,5 147,4 9,7 15,2	7,8 152,7 9,9 15,5	8,1 157,4 10,0 15,7	8,4 165,3 10,3 16,1	8,6 170,8 10,5 16,4	8,9 175,6 10,6 16,6	9,3 180,3 10,8 16,8	9,6 185,5 10,9 17,0	10,0 190,5 11,0 17,2	280
115,5 13,5	6,3 125,0 9,0 14,0	6,6 130,1 9,1 14,2	6,8 135,5 9,4 14,6	7,2 140,1 9,5 14,8	7,4 147,7 9,7 15,2	7,7 152,6 9,9 15,5	8,0 157,8 10,0 15,7	8,4 162,7 10,2 16,0	8,5 171,2 10,5 16,4	8,8 176,8 10,6 16,6	9,2 181,7 10,8 16,9	9,6 186,7 11,0 17,1	9,9 192,0 11,1 17,4	10,2 197,0 11,2 17,6	300
124,7 14,0	6,7 134,4 9,3 14,5	7,1 140,4 9,6 14,8	7,3 146,1 9,7 15,1	7,6 152,3 9,9 15,4	7,9 159,0 10,1 15,8	8,2 164,9 10,3 16,1	8,6 170,6 10,5 16,4	9,0 175,8 10,6 16,6	9,1 184,9 10,9 17,0	9,5 191,8 11,1 17,3	9,8 196,6 11,2 17,5	10,2 201,2 11,4 17,8	10,5 207,1 11,5 18,0	10,9 213,0 11,7 18,2	350
133,1 14,4	7,2 144,6 9,6 15,0	7,5 150,4 9,8 15,4	7,8 156,7 10,0 15,6	8,1 162,9 10,2 16,0	8,5 170,0 10,4 16,3	8,8 176,3 10,6 16,6	9,2 182,4 10,8 16,8	9,6 188,0 11,0 17,1	9,7 198,0 11,3 17,6	10,0 205,0 11,9 17,9	10,4 210,0 11,6 18,2	10,8 214,7 11,7 18,3	11,2 221,9 11,9 18,6	11,6 228,9 12,1 18,9	400
141,5 14,9	7,7 152,5 9,9 15,5	7,9 157,4 10,1 15,8	8,3 166,1 10,3 16,1	8,6 173,0 10,4 16,4	9,0 180,7 10,8 16,8	9,3 186,7 11,0 17,1	9,8 193,6 11,1 17,4	10,1 199,4 11,3 17,6	10,3 209,6 11,6 18,1	10,6 216,2 11,8 18,4	11,0 223,3 12,0 18,7	11,5 228,3 12,1 18,9	11,8 235,6 12,3 19,2	12,2 240,9 12,4 19,4	450
149,1 15,3	8,1 161,0 10,2 15,9	8,4 167,9 10,4 16,2	8,8 175,4 10,6 16,6	9,0 182,2 10,8 16,9	9,5 190,3 11,0 17,2	9,8 197,1 11,2 17,6	10,2 204,1 11,4 17,9	10,6 210,7 11,6 18,2	10,9 221,1 11,9 18,6	11,2 227,5 12,1 18,9	11,6 234,7 12,2 19,1	12,1 241,8 12,5 19,5	12,4 247,3 12,6 19,7	12,8 254,7 12,8 20,0	500
156,7 15,6	8,5 169,2 10,5 16,2	8,8 176,3 10,6 16,6	9,2 184,3 10,9 17,0	9,3 191,3 11,1 17,3	9,9 199,8 11,4 17,7	10,3 207,8 11,5 18,0	10,7 213,4 11,7 18,2	11,1 220,5 11,9 18,7	11,4 231,9 12,2 19,1	11,8 238,8 12,4 19,3	12,2 246,2 12,6 19,6	12,6 253,4 12,7 19,9	13,0 259,1 12,9 20,1	13,5 266,7 13,1 20,5	550
164,0 16,0	8,8 177,7 10,6 16,6	9,2 184,3 10,9 17,0	9,6 192,2 11,1 17,4	10,0 199,9 11,3 17,7	10,4 208,1 11,5 18,0	10,8 216,1 11,8 18,4	11,3 223,5 12,0 18,7	11,7 230,8 12,2 19,1	11,9 242,4 12,5 19,5	12,3 250,1 12,6 19,8	12,8 257,7 12,8 20,1	13,2 263,0 13,0 20,3	13,6 270,9 13,2 20,6	14,1 278,6 13,4 20,9	600
	9,2 183,7 10,8 17,0	9,6 192,0 11,1 17,4	10,0 199,7 11,3 17,6	10,4 207,7 11,5 18,0	10,8 216,6 11,8 18,4	11,3 224,7 12,0 18,8	11,7 232,3 12,2 19,1	12,1 239,7 12,4 19,4	12,4 251,6 12,7 19,8	12,8 259,5 12,9 20,1	13,3 267,2 13,1 20,5	13,7 274,7 13,3 20,7	14,2 282,7 13,4 21,0	14,6 290,6 13,7 21,4	650
			10,4 207,6 11,5 18,0	10,8 215,9 11,8 18,4	11,2 225,5 12,0 18,8	11,6 233,4 12,2 19,1	12,1 241,1 12,4 19,4	12,6 248,7 12,6 19,7	12,9 261,1 13,0 20,2	13,2 270,8 13,2 20,6	13,8 276,7 13,4 20,8	14,2 284,3 13,5 21,1	14,7 292,5 13,7 21,4	15,2 300,5 13,9 21,7	700
			10,7 214,6 11,7 18,3	11,2 223,7 12,0 18,7	11,6 232,9 12,2 19,1	12,1 242,0 12,5 19,5	12,5 249,9 12,6 19,8	13,4 257,6 12,9 20,1	13,3 271,1 13,2 20,6	13,7 280,2 13,4 21,0	14,3 288,2 13,6 21,2	14,8 296,0 13,8 21,5	15,2 304,5 14,0 21,8	15,7 312,4 14,2 22,1	750
					12,0 241,2 12,4 19,4	12,4 248,9 12,6 19,8	12,9 257,4 12,8 20,1	13,5 266,5 13,1 20,4	13,7 279,6 13,4 20,9	14,2 287,7 13,6 21,2	14,7 297,7 13,8 21,6	15,2 305,6 14,0 21,9	15,7 312,1 14,2 22,1	16,2 322,4 14,4 22,5	800
							13,4 265,7 13,0 20,4	13,9 274,8 13,2 20,6	14,2 288,6 13,6 21,2	14,6 297,2 13,8 21,6	15,2 307,2 14,0 21,9	15,7 315,3 14,2 22,2	16,2 321,9 14,4 22,5	16,7 332,4 14,6 22,8	850
								14,3 282,6 13,4 21,0	14,6 296,4 13,8 21,6	15,0 306,6 14,0 21,9	15,7 314,9 14,2 22,2	16,2 325,0 14,4 22,6	16,7 333,8 14,6 22,8	17,2 342,4 14,8 23,1	900
										15,4 314,0 14,2 22,2	16,1 322,3 14,4 22,5	16,7 332,7 14,6 22,8	17,1 341,7 14,8 23,1	17,7 350,3 15,0 23,4	950
											16,6 332,1 14,6 22,8	17,1 340,5 14,8 23,1	17,6 349,5 15,0 23,4	18,2 360,2 15,2 23,8	1000
												17,4 350,1 15,0 23,4	18,1 359,3 15,2 23,7	18,6 368,2 15,4 24,0	1050
														19,1 378,1 15,6 24,3	1100

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Таблица 2

$\frac{H}{\lambda_0}$	α	β	$\frac{H}{\lambda_0}$	α	β
0,01	0,119	0,251	0,26	0,724	0,753
0,02	0,161	0,306	0,28	0,740	0,767
0,03	0,200	0,352	0,30	0,765	0,780
0,04	0,238	0,394	0,35	0,796	0,810
0,05	0,275	0,428	0,40	0,823	0,832
0,06	0,310	0,462	0,45	0,850	0,854
0,07	0,343	0,493	0,50	0,866	0,871
0,08	0,378	0,519	0,55	0,890	0,890
0,09	0,406	0,542	0,60	0,904	0,904
0,10	0,435	0,564	0,65	0,918	0,918
0,12	0,485	0,596	0,70	0,930	0,930
0,14	0,540	0,635	0,75	0,942	0,942
0,16	0,582	0,662	0,80	0,956	0,956
0,18	0,617	0,685	0,85	0,967	0,967
0,20	0,652	0,703	0,90	0,980	0,980
0,22	0,679	0,720	0,95	0,990	0,990
0,24	0,703	0,736	1,00	1,00	1,00

где H — глубина в заданной точке, *м*;

λ_0 — длина глубоководной волны при заданной скорости ветра и величине разгона до заданной точки.

По табл. 2, пользуясь величиной $\frac{H}{\lambda_0}$, находим коэффициенты α и β.

Подставляя значения h_0, λ_0, β и α в формулы (15) и (31), получаем расчетные элементы волн.

Пусть, например, расчетная скорость ветра W равна 25 *м/сек*, измеренный по карте разгон D по заданному направлению ветра равен 120 *км* и глубина в заданной точке — 10 *м*. Определим высоту и длину максимальных волн в заданной точке.

В табл. 1 находим колонку, соответствующую скорости ветра 25 *м/сек*. Предельный разгон D_0, соответствующий данной скорости ветра, будет равен 937 *км*. Принимается для расчета меньшая величина из измеренного и предельного разгонов, т. е. в нашем случае $D = 120$ *км*.

На пересечении граф скорости ветра 25 *м/сек* и разгона 120 *км* (вертикальная графа справа) находим квадрат, содержащий величины элементов глубоководных волн, соответствующих заданным условиям. Верхние клетки квадрата дают соответственно высоту и длину волн, нижние — период

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

и скорость их распространения. Получаем $h_0 = 5{,}2$ *м*, $\lambda_0 = 89{,}2$ *м* и определяем отношение $\frac{H}{\lambda_0}$:

$$\frac{H}{\lambda_0} = \frac{10}{89{,}2} = 0{,}111\,.$$

Далее по табл. 2 следует отыскать коэффициенты α и β, соответствующие значению $\frac{H}{\lambda_0} = 0{,}111$. Так как этой величины $\frac{H}{\lambda_0}$ в табл. 2 нет, то берем ближайшие значения $\frac{H}{\lambda_0} = 0{,}10$ и $0{,}12$ и по интерполяции получаем значения $\alpha = 0{,}460$, $\beta = 0{,}580$.

Мелководные элементы волн, в соответствии с (15) и (31), будут:

$$h = h_0\beta = 5{,}2 \times 0{,}580 = 3{,}0 \text{ м};$$

$$\lambda = \lambda_0\alpha = 89{,}2 \times 0{,}460 = 4{,}1 \text{ м}.$$

Расчет по номограмме (фиг. 4) весьма прост. Линейка прикладывается к соответствующим значениям скорости ветра W и разгона D, размещенных на крайних шкалах. По средней шкале делается отсчет высоты h_0 и длины λ_0 волн глубокой воды.

Определение коэффициентов α и β не отличается от изложенного выше и производится по табл. 2.

Следует иметь в виду, что точность расчетов по номограмме меньше табличной и может давать отклонения в отдельных случаях до 10%, что все же находится в пределах точности волновых расчетов.

При расчетах по формуле (34) следует иметь в виду, что в формулу высоты волн глубокой воды (44), использованную при построении табл. 1 и номограммы, входит коэффициент K, отражающий повышенную интенсивность развития высоты волн на коротких разгонах. В связи с этим табл. 1 и номограмму нельзя использовать при расчете высоты волны, выполняемом путем суммирования высот по отдельным участкам. Для этого случая следует вести расчет глубоководной высоты волны для каждого участка по формуле (44), положив коэффициент $K = 1$. После того как будет определена суммарная высота волны по формуле (34) для всего водоема в целом, ее следует умножить на коэффициент K, определенный зависимостью (47).

Результаты расчетов по формулам (15) и (31) были сличены с данными непосредственных наблюдений на глубоководном и мелководном озерах, а также с данными расчетов по наиболее распространенным формулам.

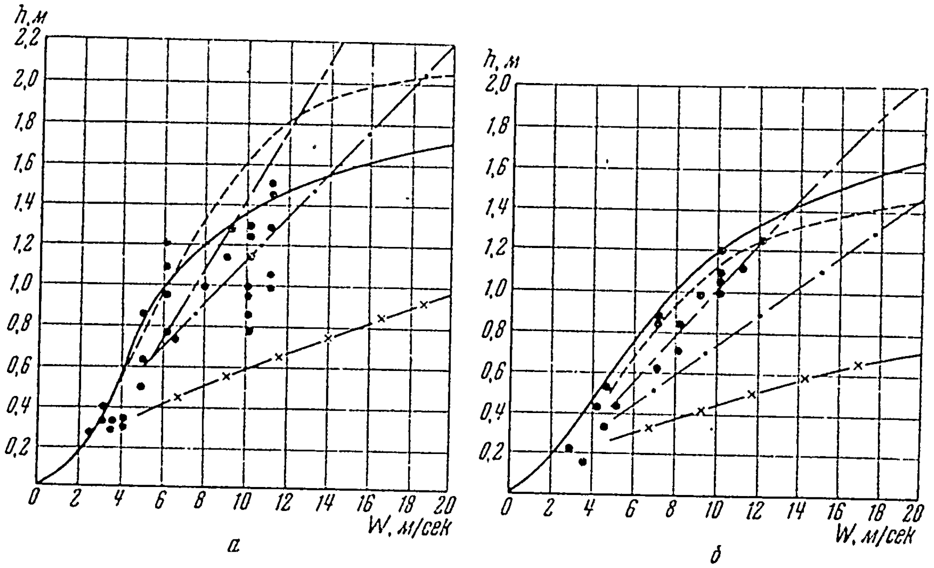
Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

На фиг. 5 и 6 приведены результаты этого сопоставления в виде графиков связи между высотой волны и скоростью ветра. Точками обозначены данные наблюдений, линиями — результаты расчетов по различным формулам.

Как видно из графиков, формула (13) по сравнению с данными натурных наблюдений дает достаточно осторожное решение.

Удовлетворительное совпадение показывает также метод В. Г. Андреянова, дающий, впрочем, для указанных условий несколько преувеличенные данные.



Фиг. 5. Сравнение высоты волн для глубоководного озера ($H_{ср.} \geqslant 50$ м), наблюденных и рассчитанных по формулам разных авторов, для $H = 3,5$ м и двух длин разгона:

$а$ — $D = 120$ км; $б$ — $D = 40$ км.

Условные обозначения: ——— Лабзовский, — — — Андреянов — . — Шишов, ×—×—× Дьякова, — ——— — Браславский; ● — наблюденные данные

Расчет по методу А. П. Браславского привел к величинам, согласующимся с наблюдениями для условий глубоководного озера. Для мелководного озера по методу А. П. Браславского получились преуменьшенные высоты волн.

Формулы Н. Д. Шишова дают не всегда удовлетворительное совпадение, если вместо средней глубины, рекомендуемой автором, вводить в расчет глубину в данной точке. Введение средней глубины для глубоководных водоемов не дает возможности определять элементы прибрежного волнения.

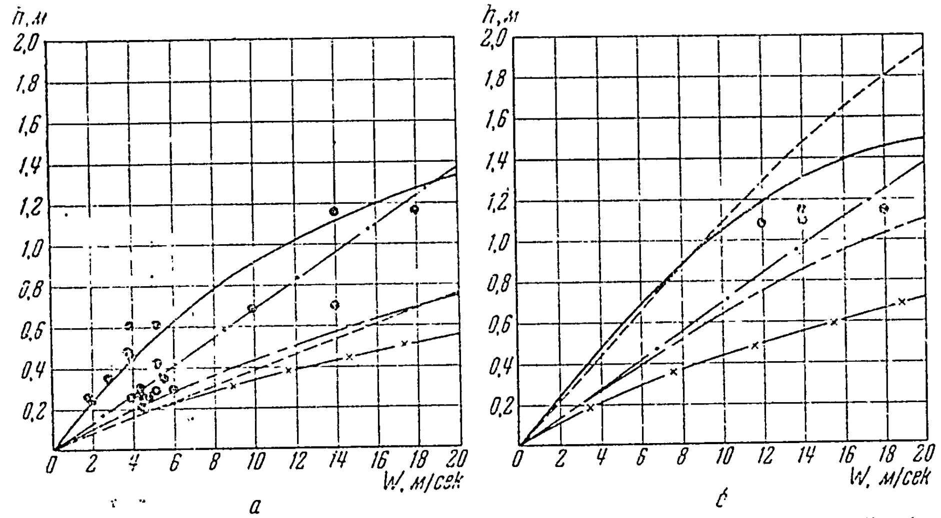
Формула Е. А. Дьяковой дает значительно преуменьшенные высоты волн.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Во время волнения размеры волн всегда бывают различными, но имеют вполне определенный максимум, соответствующий силе ветра и разгона. Выше, при определении элементов волн по различным формулам, мы указывали характеристику их (средние, максимальные и т. д.).

За последние годы в работах А. П. Браславского было введено понятие обеспеченности высоты волн и предложена методика определения обеспеченности, основанная на предположении, что волнение представляет собою последователь-



Фиг. 6. Сравнение высоты волн для мелководного озера ($H_{ср.} \leq 3,5$ м), наблюденных и рассчитанных по формулам разных авторов, для $D=40,0$ км и двух значений глубины:

а — $H=2,0$ м; б — $H=3,75$ м.

Условные обозначения: ——— Дабзовский, — — — Андреянов, — . — Шипов, × — × — × Дьякова, — ——— — Браславский; ○ — наблюденные данные

ность отдельных волн, не связанных друг с другом, к которой полностью применимы законы теории вероятности.

Это позволило, пользуясь обычной методикой, вычислить волны заданной обеспеченности. В частности, А. П. Браславский рекомендует определять волны 0,1% обеспеченности (одну из тысячи).

В практических вопросах понятие обеспеченности имеет смысл только тогда, когда известно, как часто будет наблюдаться изучаемое явление и какой величины оно может достигать в заданный промежуток времени. Указанный метод не обеспечивает этого условия. Механическое сопоставление волн заданной обеспеченности из разных систем волнения, отличающихся одна от другой величинами периодов волн, приводит

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

к недоразумениям и ошибкам. Так, например, волны 0,1% обеспеченности, определенные для системы волнения, имеющей период 1 сек., будут иметь вероятность появления один раз в 1000 сек., в то время как вероятность появления волны той же обеспеченности для волнения с периодом в 10 сек. будет в десять раз меньше. Отсюда вытекает, между прочим, любопытное практическое следствие: рассчитывая сооружения на волну «заданной» обеспеченности в соответствии с изложенным выше методом А. П. Браславского, инженер должен руководствоваться положениями, противоположными основам строительной практики морских сооружений, так как в малых водоемах волна заданной обеспеченности будет, повидимому, наблюдаться чаще, чем в крупных.

Более правильной нам представляется следующая методика расчета обеспеченности высот волн.

1. При расчетах, связанных с производством гидротехнических работ или с работой водного транспорта, бывает необходимо определить число дней в навигацию с высотою волн не выше заданной.

Для подобных расчетов используются данные по ветровому режиму о повторяемости ветров по градациям скоростей и по направлениям за навигацию, в среднем за многолетний период.

Пользуясь этими сведениями и данными о величинах разгона по каждому направлению, можно вычислить высоты волн и построить таблицу их повторяемости.

2. При расчетах прочности гидротехнических сооружений определение расчетной высоты волны заданной обеспеченности следует производить по кривой обеспеченности максимальных волн, получаемой путем статистической обработки за многолетний период величин волн, наибольших за каждый год.

Наибольшая величина волны за год определяется либо из наблюдений, если они имеются, либо путем расчета при наиболее неблагоприятном в данном году сочетании скорости ветра, разгона и глубины.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Маккавеев и И. М. Коновалов. Гидравлика. Речиздат, 1940.
2. В. М. Маккавеев. Учет ветрового фактора и шероховатости дна в динамике волн и переносных течений. Тр. ГГИ, вып. 28 (82), 1951.
3. В. Г. Андреянов. Ветровая волна озеровидных водоемов. Изв. НИИ, т. XXIV—XXV, 1939.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

4. А. П. Браславский. Расчет ветровых волн. Тр. ГГИ, вып. 35 (89). Гидрометеоиздат, 1952.
5. Н. Е. Кондратьев. Потери волновой энергии на мелководье. Тр. ГГИ, вып. 28 (82). Гидрометеоиздат, 1951.
6. Н. А. Лабзовский. Определение элементов волн в зависимости от скорости ветра. Сб. тр. ЛОНИТОВТА, т. 2. Морской транспорт, 1952.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3

Коллектив авторов (под редакцией Е. В. Близняка и К. И. Россинского). Основы методики расчета русловых процессов, вызываемых на реках искусственным изменением их режима 5

Введение 5
Глава I. Общие закономерности русловых процессов . . . 11
Глава II. Влияние инженерных сооружений на гидрологический режим реки и деформации русла 29
Глава III. Основные методы прогноза русловых процессов 33
Глава IV. Заиление водохранилищ и его расчет 54
Глава V. Формирование берегов водохранилищ под действием ветровых волн 58
Глава VI. Размыв русла реки в нижнем бьефе, вызванный задержанием твердого стока водохранилищем 67
Глава VII. Деформация русел рек ниже гидроузлов за пределами зоны насыщения наносами 70
Глава VIII. Состояние перекатов в зоне выклинивания подпора и в нижнем бьефе гидроузла 73
Глава IX. Влияние мостовых переходов на русловой процесс и русловые деформации в зоне мостовых переходов 79
Глава X. Направление дальнейшей работы по совершенствованию методов прогноза русловых процессов 91

К. И. Россинский. Местный размыв речного дна в нижних бьефах крупных гидротехнических сооружений 94

Глава I. Задачи работы 94
§ 1. Направление исследований 94
§ 2. Существующие приемы расчета глубин местного размыва 96
Глава II. Гидравлика ямы размыва 107
§ 1. Задачи гидравлического исследования 107
§ 2. Изменение удельных расходов воды в нижнем бьефе сооружений 108
§ 3. Распределение скоростей течения по глубине потока в яме местного размыва 126
§ 4. Пульсация скоростей течения 140
Глава III. Размыв дна в нижнем бьефе водосбросных сооружений 154
§ 1. Причины размыва дна в нижнем бьефе 154
§ 2. Размыв дна в плоском потоке 155
§ 3. Размыв дна в пространственном потоке 165
§ 4. Учет отмостки 169
§ 5. Работа ковша 174
Выводы 183

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

С. Н. Крицкий, М. Ф. Менкель. Об оценке вероятной повторяемости редко наблюдаемых гидрологических явлений 188

§ 1. О распределении вероятностей гидрологических величин, занимающих определенные места в выборке, расположенной в убывающем порядке 188

§ 2. Об оценке вероятности превышения расходов воды, являющихся результатом совпадения экстремальных за период наблюдений величин формирующих сток факторов . . . 200

Приложение к § 2. Пример построения кривых обеспеченностей наибольших членов выборок, составленных: 1) из независимых наблюдений и 2) композиционным способом 210

С. Н. Крицкий, М. Ф. Менкель. О двоякоограниченной кривой распределения вероятностей и применении ее к гидрологическим расчетам 218

Приложение. 1. Коэффициент корреляции суммы $y = x_1 + x_2$ со слагаемым x_1 227

Приложение 2. Параметры условной кривой обеспеченности слагаемого при заданной величине суммы 228

М. Ф. Срибный. Геоморфологические характеристики водосборов 230

§ 1. О связи паводков с геоморфологическими элементами водосборов 230

§ 2. Количественная классификация рельефа водосборов . . 231

§ 3. Аналитическое описание распределения русловой сети 234

§ 4. Определение извилистости логов 237

§ 5. Аналитическое обобщение продольных профилей логов и рек 239

§ 6. Анализ связи элементов живых сечений логов 243

Выводы 246

С. Н. Крицкий, М. Ф. Менкель. О распластывании волны высоких вод при продвижении по призматическому руслу 248

§ 1. Задачи исследования 248

§ 2. Вывод основных зависимостей 250

§ 3. Некоторые сопоставления 259

Я. Д. Гильденблат. Некоторые вопросы, связанные с расчетами неустановившегося движения и оценкой располагаемых по напору пиковых мощностей гидроэлектростанции 263

1. Форма граничных условий 264

2. Определение длины нижнего бьефа, включаемой в расчет, и разбивка ее на расчетные участки 267

3. Выбор расчетного интервала времени 269

4. Учет зимних условий 269

5. Приближенная оценка режима пиковых мощностей гидроэлектростанции 270

Н. А. Лабзовский. Расчет элементов волн на мелководье 278

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

ИСПРАВЛЕНИЯ И ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
40	6 св.	местная скорость	местная скорость на высоте выступов зерен
40	10 св.	q	q_0
105	13 сн.	в призме	в принципе
114	Табл. 3, 1-я гр. справа, 1 сн.	0,220	1,220
115	Табл. 3, 1-я гр. справа, 4 сн.	1,850	1,250
123	9 св.	$\frac{\alpha_x U_x - \alpha_0 U_0}{K_x - \alpha_0 U_0} = \frac{B_0}{B}$	$\frac{\alpha_x U_x - \alpha_0 U_0}{K_x - \alpha_0 U_0 - \frac{BP}{\frac{\gamma}{g} Q B_0}} = \frac{B_0}{B}$
124	9 сн.	над	под
135	13 сн.	нижнюю часть	часть
152	Фиг. 23, по осям абсцисс	$\sqrt{\frac{\overline{u'^2}}{H^{0,5}}}$ и $\sqrt{\frac{\overline{v'^2}}{H^{0,5}}}$	$\frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{H^{0,5}}$ и $\frac{\sqrt{\overline{v'^2}}}{H^{0,5}}$
184	6 св.	сооружением	сужением

Проблемы регулирования речного стока, вып. 6.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2

Проблемы регулирования речного стока
Выпуск 6

*

Утверждено к печати Секцией по научной разработке проблем водного хозяйства

*

Редакторы издательства *В. И. Егоров* и *Б. Б. Богословский*

Технический редактор *Н. П. Аузан*

*

РИСО АН СССР № 64—68В. Сдано в набор 30/VI 1956. Подп. в печать 7/XII 1956 г. Т—11735. Формат бум. 60 × 92¹/₁₆ Печ. л. 18,75 + 7 вкл. Уч. изд. л. 20,4 (19,7 + 0,7 вкл.). Тираж 1800. Изд. № 1628.
Тип. зак. 750.

Цена 14 р. 25 к.

Издательство Академии наук СССР.
Москва, Б-64, Подсосенский пер., д. 21

1-я типография Издательства АН СССР.
Ленинград, В. О., 9-я линия д. 12.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/01/15 : CIA-RDP81-01043R001500040005-2